



Écoulement de particules dans les enceintes de l'ECS-FEBIAD : étude et optimisation

M. Faye

► To cite this version:

M. Faye. Écoulement de particules dans les enceintes de l'ECS-FEBIAD : étude et optimisation. 2014, pp.1-36. in2p3-00985564

HAL Id: in2p3-00985564

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00985564>

Submitted on 30 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Ecoulement de particules dans les enceintes de l'ECS-FEBIAD : étude et optimisation

Entreprise d'accueil : GANIL, Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, Bd Henri Becquerel,
14076 CAEN

Maître de stage : Laurent MAUNOURY, Ingénieur source au sein du groupe de production
d'ions (GPI)

Tuteur de stage : Emerson Barbosa, Responsable Master 2 ICMS

Du 14/12/2013 au 14/02/2014



Sommaire

Introduction.....	5
I. Présentation et principe de fonctionnement	6
I.1 Laboratoire GANIL	6
I.2 Installations et méthode ISOL	6
I.3 ECS-FEBIAD type VADIS	8
I.4 Efficacité	11
I.5 Performances	11
II. Simulations avec la configuration du système actuel.....	13
II.1. Logiciel de simulation	13
II.2. Géométrie de référence, conditions de simulations et paramétrages	14
II.3. Résultats de simulation - analyse	15
II.4. Tube d'injection de gaz	18
II.5. Estimation des temps de vol moyen	18
II.4.a. Temps de vol moyen total.....	19
II.4.b. Temps de vol moyen par zone	20
III. Pistes d'amélioration	22
III.1. Forme de la cible	22
III.2. Trou de sortie du tube de transfert.....	23
III.3. Tube de transfert.....	23
III.4. Trous grille d'accélération	25
III.5. Autres pistes d'amélioration (écrans & entonnoir).....	26
IV. Simulations d'effusion d'atomes ionisés	28
V. 28	
IV.1 Mise en place d'une pompe dans la zone d'ionisation	28
IV.2 Analyse des pistes d'amélioration la nouvelle configuration.....	29
CONCLUSION	31
Annexe1 : Plans GANIL, ECS-FEBIAD.....	32
Annexe 2 :	35
Références.....	36

Listes des figures

Figure 1 : Schéma de l'ensemble des installations existantes du GANIL	7
Figure 2 : Principe de fonctionnement de la méthode ISOL	8
Figure 3 : Plan 3D de l'ensemble cible source FEBIAD	9
Figure 4 : Ligne TBE de l'upgrade SPIRAL1	10
Figure 5 : Différentes pièces autour de la zone d'ionisation (anode).....	10
Figure 6 : Principe de fonctionnement de l'ECS-FEBIAD (réf.3)	11
Figure 7 : Volume actif en fonction de la configuration de l'électrode d'extraction et de la tension appliquée.....	12
Figure 8 : zone d'ionisation, en rouge le volume actif créé par l'électrode d'extraction	12
Figure 9 : Détail de la géométrie retenue pour les simulations.....	14
Figure 10 : Différentes facettes de mesure suivant les axes Z et Y.....	15
Figure 11 : Evolution de la pression de la cible à la sortie du système (pompe) en fonction de la position sur la facette de mesure.....	16
Figure 12 : Evolution de la pression en fonction de la position sur les facettes de mesure positionnées suivant l'axe Y.....	17
Figure 13 : flux de particules à travers la facette de mesure circulaire placée au milieu de la zone d'ionisation.....	17
Figure 14 : Les Tubes reliés au volume d'accueil des particules libérées par la cible.....	18
Figure 15 : Distribution de la fonction de Maxwell-Boltzmann des vitesses	19
Figure 16 : Localisation des différentes zones sur la géométrie	21
Figure 17 : cible pleine et cible sapin	22
Figure 18 : Evolution du temps de vol en fonction du diamètre de trou de sortie du tube de transfert	23
Figure 19 : Forme tube de transfert.....	24
Figure 20 : Géométrie avec tube de transfert conique.....	25
Figure 21 : augmentation diamètre trou de sorti grille d'accélération (à gauche la réf. avec un diamètre de 1.6 mm, au milieu 2mm, 2,5 et 4,98 mm à droite).....	25
Figure 22 : modification espace entre trou de sortie tube transfert et grille d'accélération (a : limite de l'espace, b : emplacement de l'écran, c : emplacement de l'entonnoir).....	26
Figure 23 : Pression sur la facette située au niveau de la zone d'ionisation.....	27
Figure 24 : flux de particules sortant sur la facette située au niveau de la zone d'ionisation	28
Figure 25 : configuration avec les écrans et la pompe dans la zone d'ionisation.....	30

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement mon maître de stage Mr Laurent MAUNOURY ainsi que Mr Pascal JARDIN, chef du groupe GPI, qui m'ont permis de réaliser mon second stage au sein du GANIL et qui m'ont formé et accompagné tout au long de ce stage.

Je remercie Mr Olivier Bajeat, Ingénieur GPI et également Mr Patrice Lecompte, assistant ingénieur du "Groupe Bureau d'Etudes Mécanique", avec qui j'ai beaucoup travaillé sur la conception des géométries.

Je remercie enfin l'ensemble du groupe GPI que j'ai côtoyé pendant ces trois mois, chacun de ses membres m'ayant aidé dans ses domaines de compétences et ayant facilité mon intégration dans le laboratoire. L'ouverture d'esprit et la disponibilité de ce groupe m'ont permis d'apprendre dans une atmosphère propice au bon déroulement de ce stage.

Introduction

Le GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) est un laboratoire de production de faisceaux d'ions pour une utilisation divers par les scientifiques et chercheurs du monde entier.

Le principe de la fabrication de faisceaux d'ions radioactifs par la méthode ISOL (Isotope Separator On Line) passe par la création d'un faisceau primaire d'ions stables, à partir d'une source, qui est envoyé sur une cible, constituée d'un matériau variant en fonction des ions radioactifs à produire. Lorsque le faisceau primaire viendra percuter la cible, de nouvelles particules seront créées, parmi lesquelles se trouveront les espèces d'intérêt qui sont radioactive. La cible est chauffée à haute température afin que les atomes radioactifs diffusent rapidement hors de la cible et effusent jusqu'à la source d'ions où ils sont ionisés. L'ensemble constitué de la cible, du tube de transfert et de la source d'ions est ce que l'on appelle un ECS (Ensemble Cible Source).

La source FEBIAD (Forced Electron Beam Induced Arc Discharge) a été développée pour la production de faisceaux radioactifs.

Les tests effectués jusqu'à ce jour au CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire) puis au GANIL sur la source FEBIAD, ont montrés le grand potentiel de cette source en terme d'efficacité d'ionisation et de diversité d'éléments produits.

Dans le cadre du projet Upgrade SPIRAL1, l'utilisation d'une source pouvant délivrer une gamme supplémentaire de faisceaux d'ions radioactifs est un grand enjeu. C'est dans ce contexte de développement, que nous choisissons d'effectuer des simulations dans le but d'optimiser l'effusion dans les enceintes de l'ECS-FEBIAD.

Nous effectuerons dans un premier temps une brève présentation du laboratoire et de l'ECS-FEBIAD. Nous effectuerons une simulation du système actuel pour avoir une vision globale sur l'effusion dans ce système.

Les simulations seront effectuées avec le code Molflow qui est un logiciel de simulation d'écoulement de particules dans le vide avec la méthode Monte Carlo. Le but de nos simulations est d'améliorer l'efficacité de l'effusion de la cible jusqu'à la zone d'ionisation. Pour cela nous procéderons à diverses simulations visant à comparer et quantifier la contribution de la géométrie de certaines zones et configurations sur le temps moyen d'écoulement des atomes. L'objectif est d'identifier les différentes pistes d'améliorations favorisant l'effusion des particules.

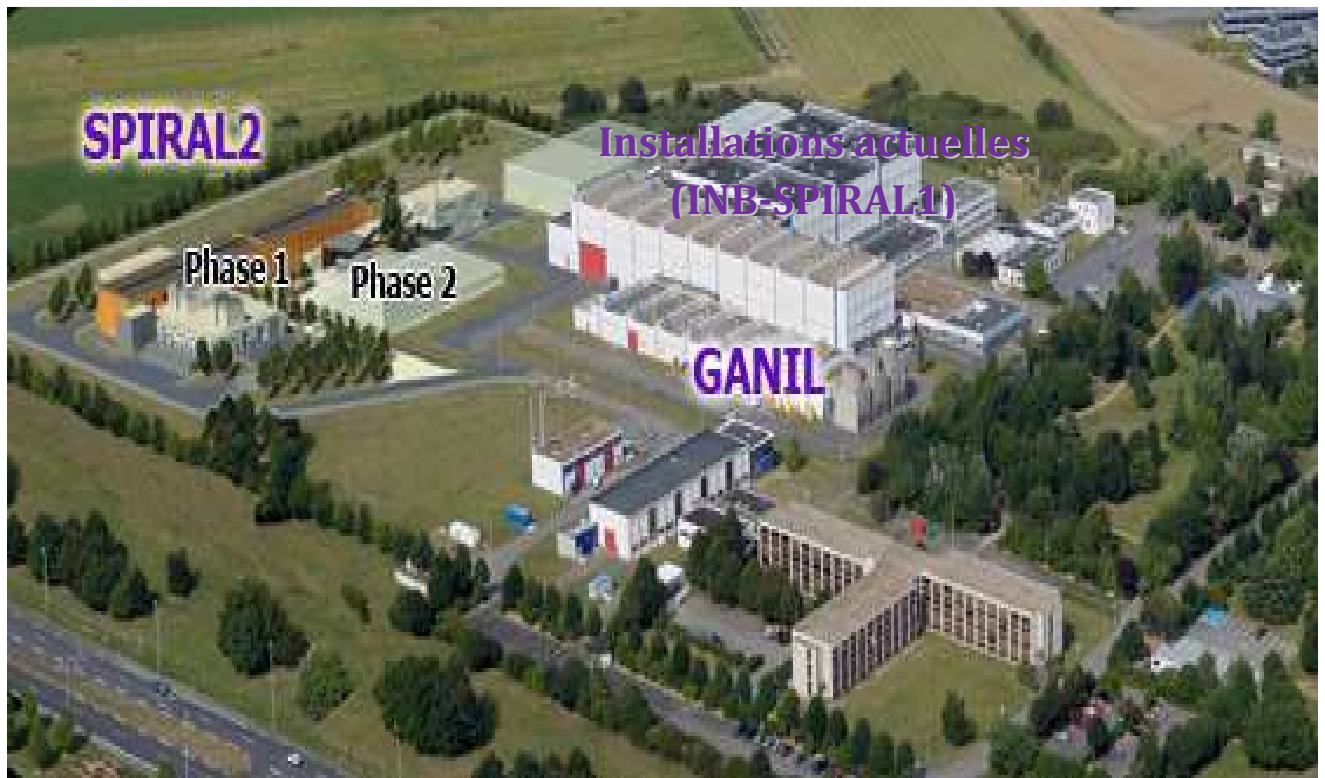
L'analyse des résultats de cette première simulation, nous permettra de voir les différents freins à l'écoulement des particules et d'élaborer des pistes d'améliorations.

Puis nous essaierons de nous rapprocher des conditions d'effusion de particules qui seront ionisées. L'approche adoptée sera la mise en place d'une pompe dans la zone d'ionisation en plus de celle que nous avons en sortie de système. On considère tout atome absorbé par la pompe située dans la zone d'ionisation comme un ion, ce qui nous permet de d'estimer le temps de vol moyen plus réaliste pour ces atomes transformé en ions et de comparer ce temps à celui des atomes en sortie.

I. Présentation et principe de fonctionnement

I.1 Laboratoire GANIL

On distingue divers domaines de recherche au GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) : de la physique nucléaire à la radiobiologie en passant par la physique atomique et la physique de l'état solide. On y étudie la réaction de la matière à des échelles différentes (noyau, atome, molécule, tissu cellulaire...), lorsqu'elle est soumise à un faisceau intense d'ions stables et radioactifs. Le GANIL est un accélérateur de particules commun au CNRS/IN2P3 et CEA/DSM. Il a été implanté à Caen dans les années 80 et forme avec d'autres laboratoires du Campus Jules Horowitz un grand pôle scientifique de renommée internationale. Il emploie actuellement un peu plus de 250 physiciens, ingénieurs et techniciens. Le GANIL est un laboratoire qui accueille la communauté scientifique internationale pour l'utilisation des faisceaux d'ions stables et radioactifs produits.



I.2 Installations et méthode ISOL

Le GANIL comprend deux installations dédiées à la production d'ions radioactifs nommées SPIRAL (Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne) SPIRAL1 en cours d'exploitation et SPIRAL2 qui sera mis en exploitation ultérieurement.

L'installation SPIRAL 1 (1^{ère} génération) délivre des faisceaux exotiques depuis 2001. Dans le cadre du projet Upgrade SPIRAL 1, elle est en cours d'amélioration afin d'augmenter la palette de sa gamme de production en ions exotiques. Dans ce cadre, de nouveaux instruments comme l'ECS-FEBIAD sont en cours de tests.

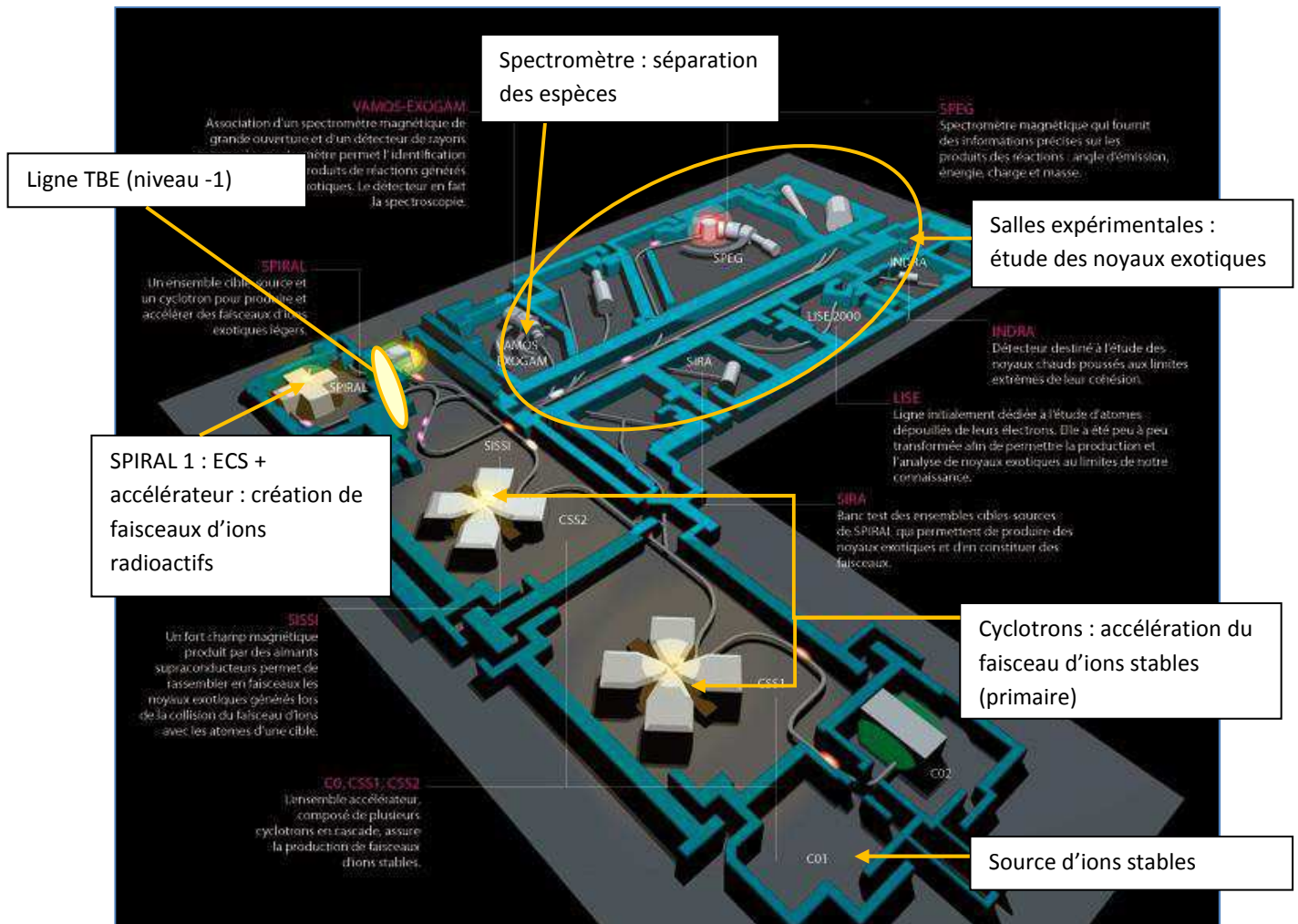


Figure 1 : Schéma de l'ensemble des installations existantes du GANIL

Le faisceau est envoyé sur une cible épaisse. Les noyaux radioactifs créés diffusent hors de la cible puis effusent dans la zone de transfert jusqu'à la source d'ionisation. L'effusion dépend fortement de la géométrie des enceintes. Les particules sont ensuite ionisées puis séparées par des spectromètres de type dipôle magnétique avant d'être ré-accélérées et envoyées vers les salles d'expériences. C'est la méthode ISOL et l'ensemble du système de la cible à la zone d'ionisation est appelé ECS (Ensemble Cible-Source).

On utilise cette méthode pour la production de faisceaux d'ions radioactifs au GANIL : installations SPIRAL1 et SPIRAL 2.

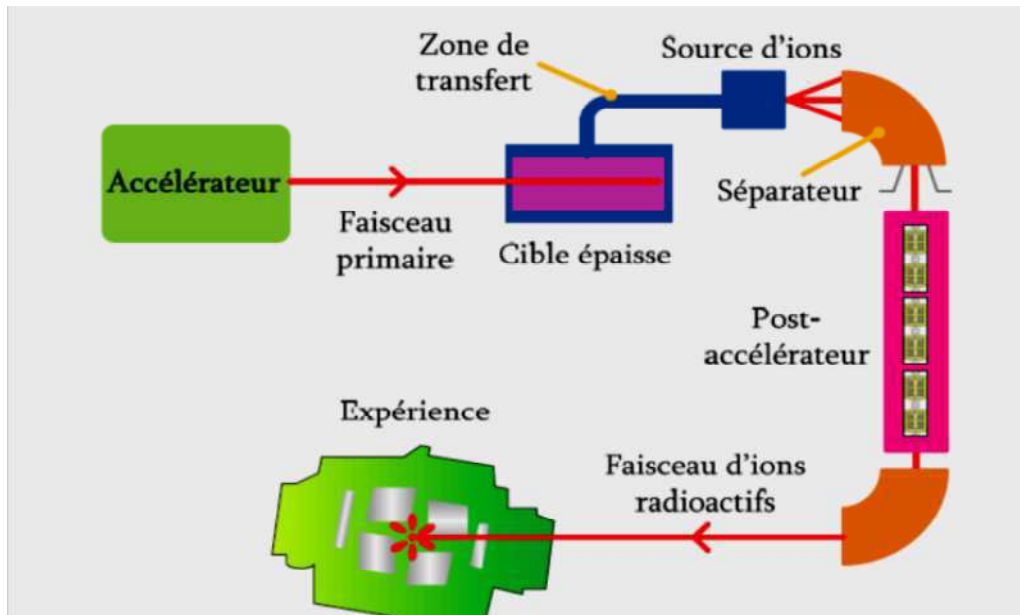


Figure 2 : Principe de fonctionnement de la méthode ISOL

I.3 ECS-FEBIAD type VADIS

Développé par R. Kirchner et E. Roeckl en 1976, l'ECS-FEBIAD a subi d'importantes modifications dans le but d'améliorer l'efficacité d'ionisation. On distingue à ISOLDE-CERN différents prototypes dont la MK7 (tube de transfert froid pour favoriser les gaz), MK5 (tube de transfert chaud pour favoriser les condensables) et la VADIS (Versatile Arc Discharge Ion Source) qui est une amélioration de la MK5 (réf.3).

L'ECS-FEBIAD de type VADIS est un Ensemble Cible Source qui a l'avantage d'ioniser la plupart des éléments sans sélectivité. Elle est utilisée pour la production des ions dits « métalliques » ou « condensables ». Ces ions radioactifs sont produits par la fragmentation des noyaux du faisceau primaire sur une cible en graphite (Figure 3). Les atomes ainsi créés diffusent hors de la cible, puis effusent jusqu'à la zone d'ionisation où ils sont transformés en ions principalement par impact électronique dans un plasma chaud créé par une décharge électrique par arc. L'ionisation par surface se produit également mais en faible proportion dans cette zone et dans le tube de transfert. Avec la polarisation, ces ions présents dans le tube sont repoussés et auront probablement le temps de se neutraliser.

Ces ions sont extraits pour constituer un faisceau d'ions radioactifs (Figure 6).

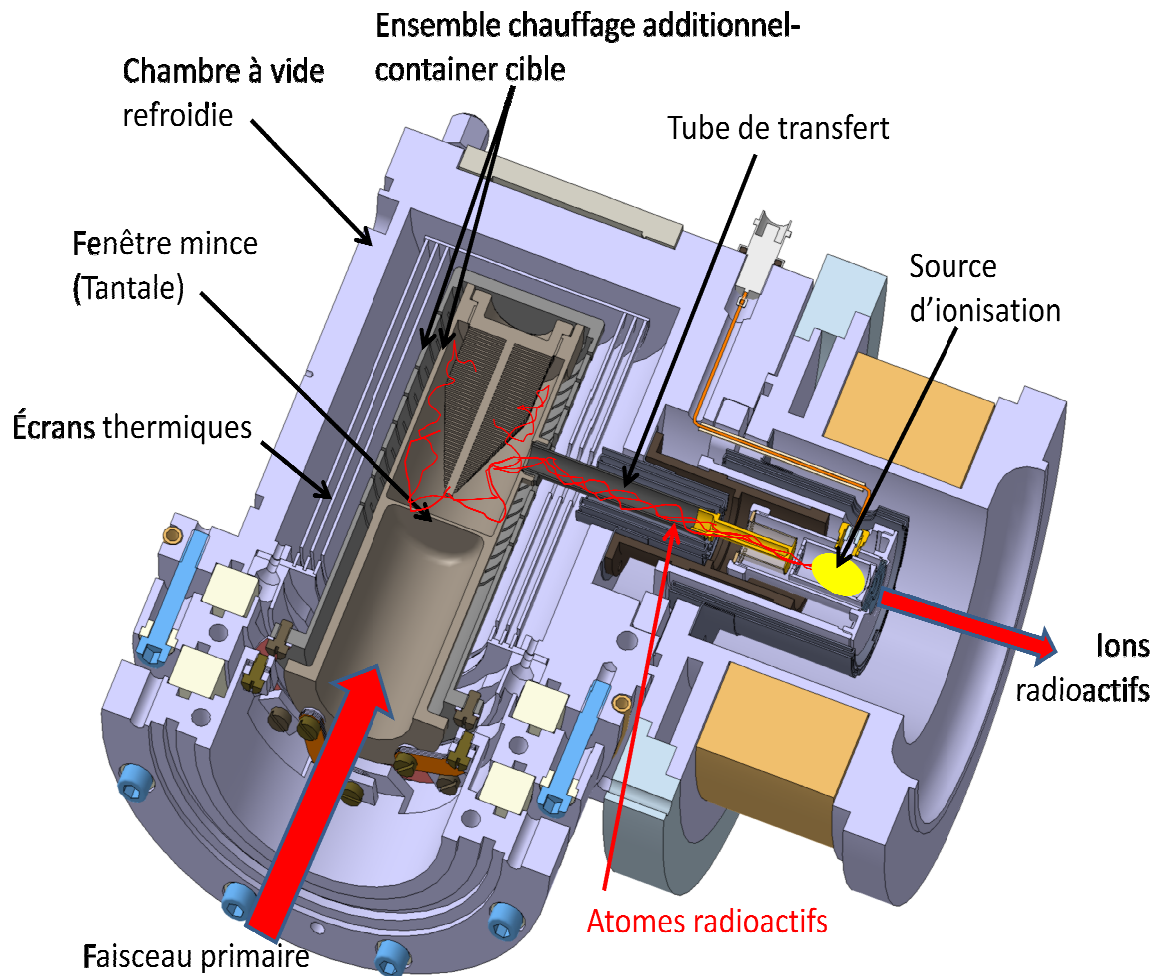


Figure 3 : Plan 3D de l'ensemble cible source FEBIAD

L'ECS-FEBIAD étant très compact en comparaison de certaine source comme l'ECS Nanogan III actuelle (Annexe 1.C), une boîte optique fait l'interface entre la source FEBIAD et l'électrode d'extraction de SPIRAL1. Cette boîte optique permet une première mise en forme du faisceau.

L'ECS sera installé dans la casemate de production de l'installation SPIRAL1 (Figure 4) pour délivrer des faisceaux d'ions radioactifs qui seront analysés puis redirigés vers le Booster pour en augmenter la charge $1+/n+$ puis redirigés de nouveau vers un cyclotron CIME avant d'être envoyé vers les salles d'expériences.

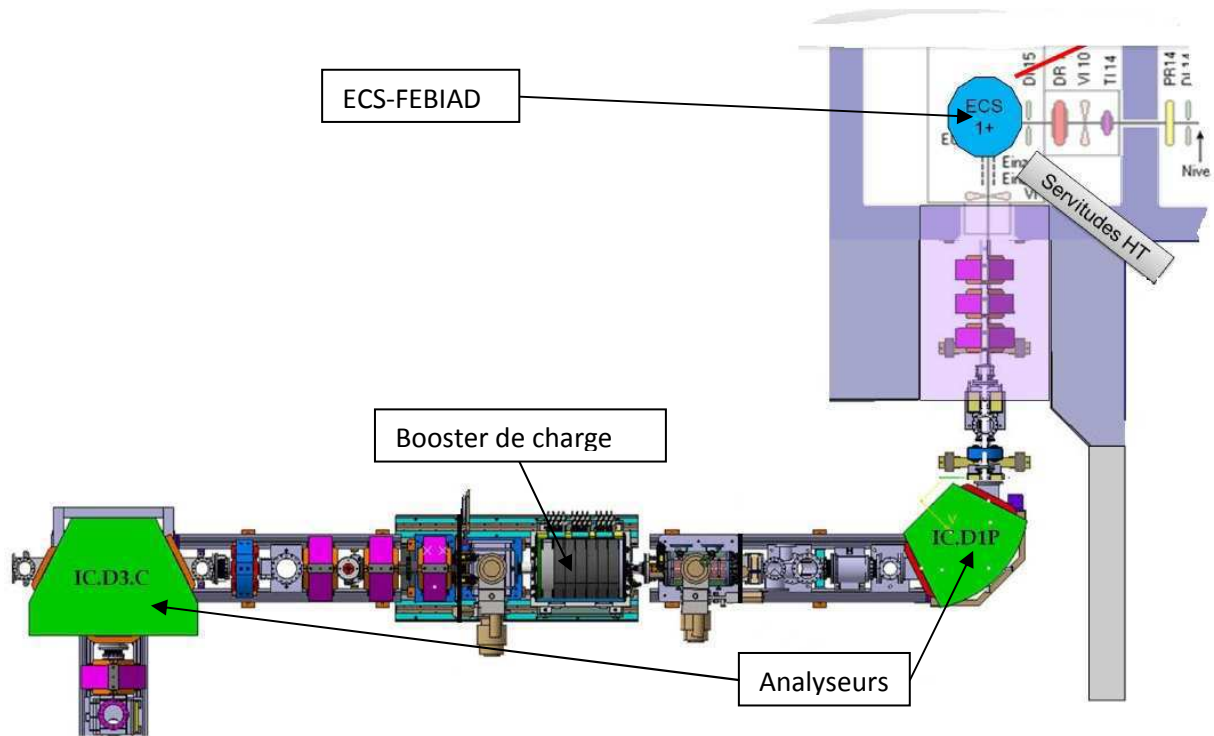


Figure 4 : Ligne TBE de l'upgrade SPIRAL1

L'ECS-FEBIAD est composée d'une cathode chaude émettrice d'électrons, et d'une anode, qui délimite avec la grille d'accélération le volume du plasma dans le quel nous avons l'ionisation par impact électronique. L'anode est portée à un potentiel égal à 150V pour accélérer les électrons. Une bobine autour de la FEBIAD permet d'étendre la trajectoire des électrons dans le volume de l'anode, en créant suivant l'axe de la source un faible champ magnétique (quelques mT, 20mT max). Un écran thermique est positionné juste après le trou de sortie de la zone d'ionisation (anode) pour éviter la diffusion de la chaleur de la zone d'ionisation vers l'électrode d'extraction. Cet écran comporte trois orifices de diamètre croissant (1.4, 5 et 8 mm) suivant la direction Z. Cette diffusion de la chaleur pourrait engendrer une diminution de l'ionisation et de l'extraction.

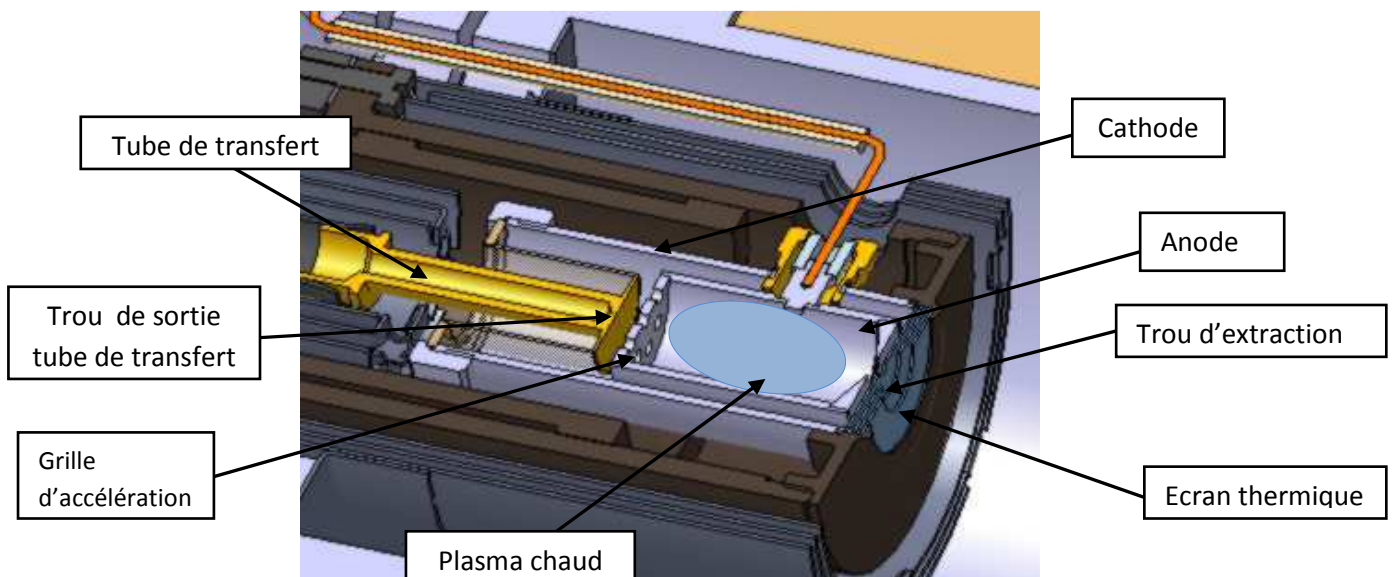


Figure 5 : Différente pièces autour de la zone d'ionisation (anode)

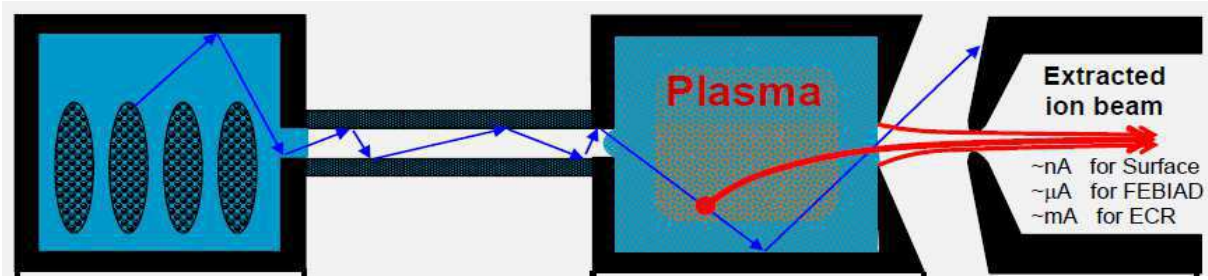


Figure 6 : Principe de fonctionnement de l'ECS-FEBIAD (réf.3)

I.4 Efficacité

L'efficacité de l'effusion, de la diffusion et de l'ionisation constituent l'efficacité globale de l'ECS-FEBIAD (équation 3). L'optimisation de cette dernière nécessite une amélioration des trois efficacités. Dans notre étude nous nous limitons à l'optimisation de l'effusion. Pour cela nous effectuerons des comparaisons de temps de vol moyen caractérisant l'effusion et de voir parmi les différents tests les quels montrent des temps plus courts.

$$\xi_{FEBIAD} = \xi_{diff} \times \xi_{eff} \times \xi_i \quad \text{Équation 1}$$

avec ξ_{diff} : efficacité de diffusion
 ξ_{eff} : efficacité d'effusion
 ξ_i : efficacité d'ionisation

L'évolution de cette source a donné naissance à plusieurs versions de l'ECS-FEBIAD. La comparaison de l'efficacité de la version MK5 et de la VADIS nous montre une efficacité plus élevée pour la VADIS (Ce qui justifie son utilisation au GANIL.

). Ce qui justifie son utilisation au GANIL.

I.5 Performances

Différents prototypes d'ECS-FEBIAD (MK5, MK7, VADIS) ont été testés dans divers laboratoires comme TRIUMF (..) dans le cadre du projet ISAC (Isotope Separator and Accelerator), au CERN dans cadre du projet ISOLDE (Isotope Separator On Line DEvice) et actuellement au GANIL dans le cadre du projet Upgrade SPIRAL1. L'efficacité d'ionisation est reliée au volume actif dans la zone d'ionisation qui dépend directement de la tension appliquée à l'électrode d'extraction (Figure 7) et de la configuration de cette dernière. Le rapport de ces deux volumes nous donne le facteur d'extraction (Figure 8).

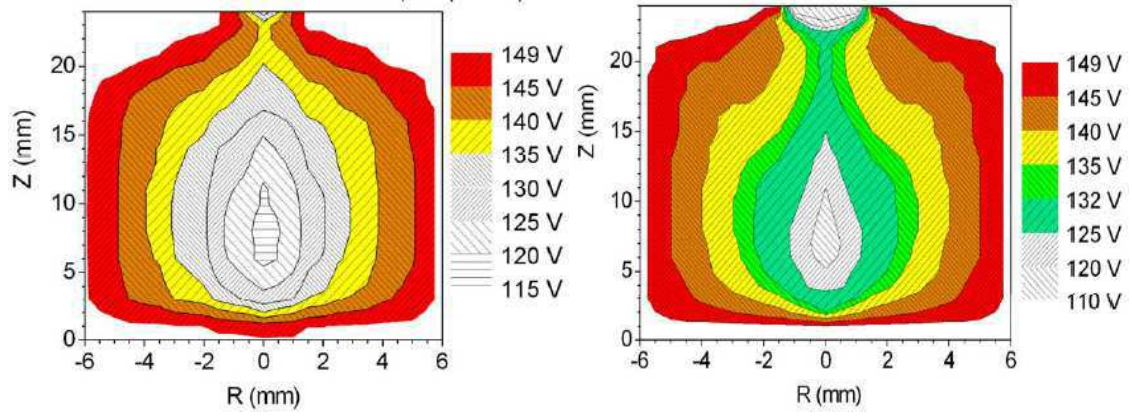


Figure 7 : Volume actif en fonction de la configuration de l'électrode d'extraction et de la tension appliquée (à gauche MK7 et à droite VADIS)

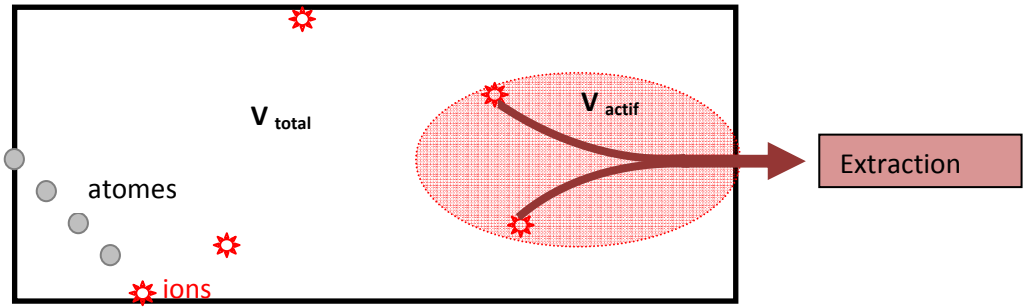


Figure 8 : zone d'ionisation, en rouge le volume actif créé par l'électrode d'extraction

$$f = \frac{V_{actif}}{V_{total}} \quad \text{Équation 2}$$

$$\xi_{ion} = f \times \frac{\lambda_{ion}}{Q_{n.in}} \quad \text{Équation 3}$$

avec

λ_{ion} : taux d'ionisation
 $Q_{n.in}$: flux de neutres ionisés

L'efficacité est de 10 à 20 plus grand pour les gaz rares et d'environ 3 pour les autres avec la version VADIS (

). L'augmentation de ce facteur est due à la configuration de l'électrode d'extraction de la VADIS.

Elément	He	Ne	Ar	Kr	Xe
MK7 (standard) (%)	0,14	0,36	2	4,3	11
VADIS (%)	0,37	-	7,8	11	19
gaz rares	10	18,6	13	8,8	4,3
les autres	~3				

Tableau 1 : Efficacités entre la MK7 et la VADIS pour des gaz et éléments condensables (réf. [3])

L'amélioration continue permettant une augmentation des performances par une optimisation des processus en jeu lors de la création de faisceau radioactive, accompagne la mise en place de cette source. C'est dans ce cadre que nous décidons d'effectuer les simulations.

II. Simulations avec la configuration du système actuel

II.1. Logiciel de simulation

Molflow est un programme développé par Mr Roberto KERSEVAN en 1990 au CERN (réf. [2]). C'est un programme de simulation basé sur la méthode Monte Carlo et qui permet de suivre l'historique d'une particule de son émission dans un système jusqu'à sa sortie, tout en tenant compte de l'interaction avec le milieu.

Le but de ce programme est de déterminer les paramètres clés dont l'estimation est nécessaire pour la réalisation d'expériences de production d'ions radioactifs.

Pour cela, Une géométrie est créée par le bureau d'étude en reproduisant le plus fidèlement possible le volume dans lequel circulent les particules dans le système. Cette géométrie est conçue puis enregistrée en format STL, ce qui nous permet de l'importer sans difficultés dans le programme.

Nous effectuons ensuite la mise en valeur des paramètres de simulation à savoir le taux de désorption des particules au niveau de la cible, le taux de pompage, la température et le type de réflexion sur les parois.

Nous lançons ensuite la simulation et récupérons à la fin de celle-ci les paramètres de sortie comme la distance moyenne entre deux chocs sur les parois (MFP : Mean Free Path), la distance moyenne de parcours total des particules de leur émission jusqu'à leur sortie du système (MPP : Mean Pumping Path), le nombre de chocs sur les parois, l'évolution de la pression en fonction de la position et en fonction du temps, etc.

II.2. Géométrie de référence, conditions de simulations et paramétrages

Une géométrie est créée par le bureau d'étude en reproduisant le plus fidèlement possible le volume dans lequel circulent les particules dans le système. Cette géométrie est conçue puis enregistrée en format STL, ce qui nous permet de les importer sans difficultés dans le programme.

L'étape suivante est la mise en place de facettes de mesures et la réorientation de la normale de certaines facettes afin de respecter le volume réel du système (Figure 9).

Avec notre géométrie de référence nous effectuons la mise en valeur des paramètres de simulation à savoir le taux de désorption des particules au niveau de la cible, le taux de pompage, la température et le type de réflexion sur les parois.

C'est avec des valeurs obtenues lors des tests hors lignes que nous allons estimer la valeur du taux de désorption. Pour cela nous avons un faisceau primaire d'intensité 1,4 kW, nous obtenons un taux de $9.10^{-4} \text{ l.s}^{-1}$. Ce taux de désorption sera identique dans toutes les simulations pour garantir des comparaisons de bonne qualité.

La facette qui représente notre pompe est paramétrée avec une probabilité de 100% d'évacuation des particules au niveau de cette section circulaire, ce qui nous donne un grand taux de pompage de 115739 l.s^{-1} . Nous choisissons cette valeur élevée pour simuler au maximum l'effet d'extraction des particules par l'électrode d'extraction des ions.

Toutes les parois du système sont mises à une réflexion diffuse, ce qui veut dire qu'après un choc chaque particule est réémise avec la même probabilité d'être réémises dans tous les angles compris entre 0 et 180° (loi de Knudsen en $\cos\theta$).

Tout le système est mis à une température de fonctionnement de 2000°C, ce qui favorise l'émission des particules hors de la cible, le transport de ceux-ci vers la source et l'ionisation des atomes.

L'élément choisi pour toutes les simulations est l' ^{36}Ar qui est un isotope stable de l'argon (choix arbitraire).

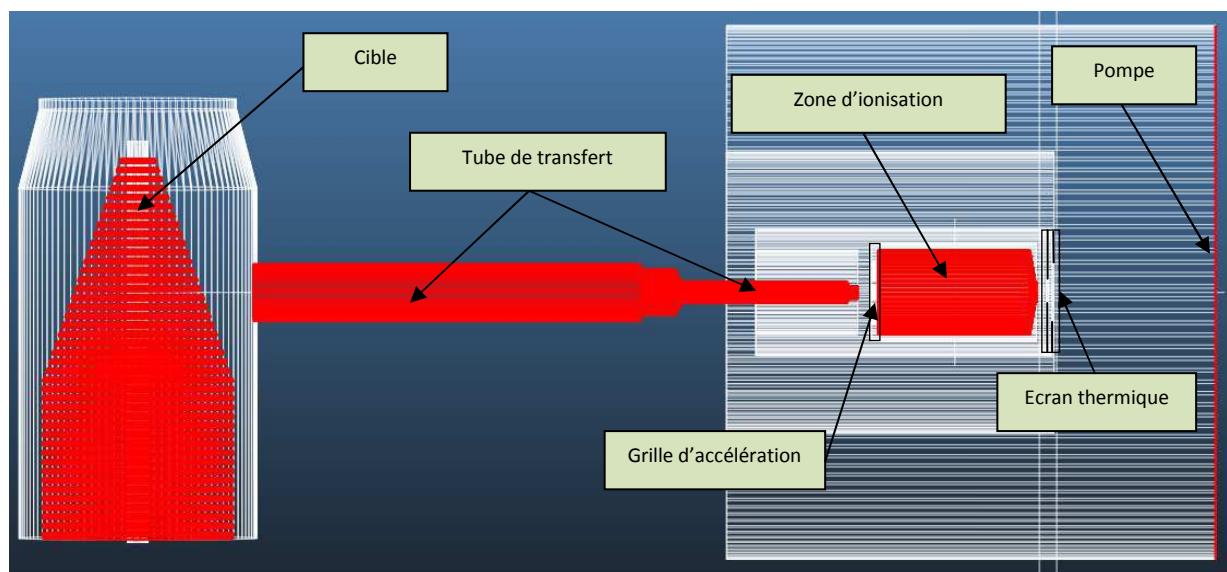


Figure 9 : Détail de la géométrie retenue pour les simulations

Nous choisissons des facettes de mesures transparentes dans divers endroits pour suivre l'évolution de la pression et du flux d'atomes à travers la zone d'ionisation. Pour chaque facette de mesure, on représente la pression en fonction de la position. La position de ces facettes de mesures est une suivant l'axe Z pour celle qui traverse l'axe de notre système, et l'autre suivant l'axe Y.

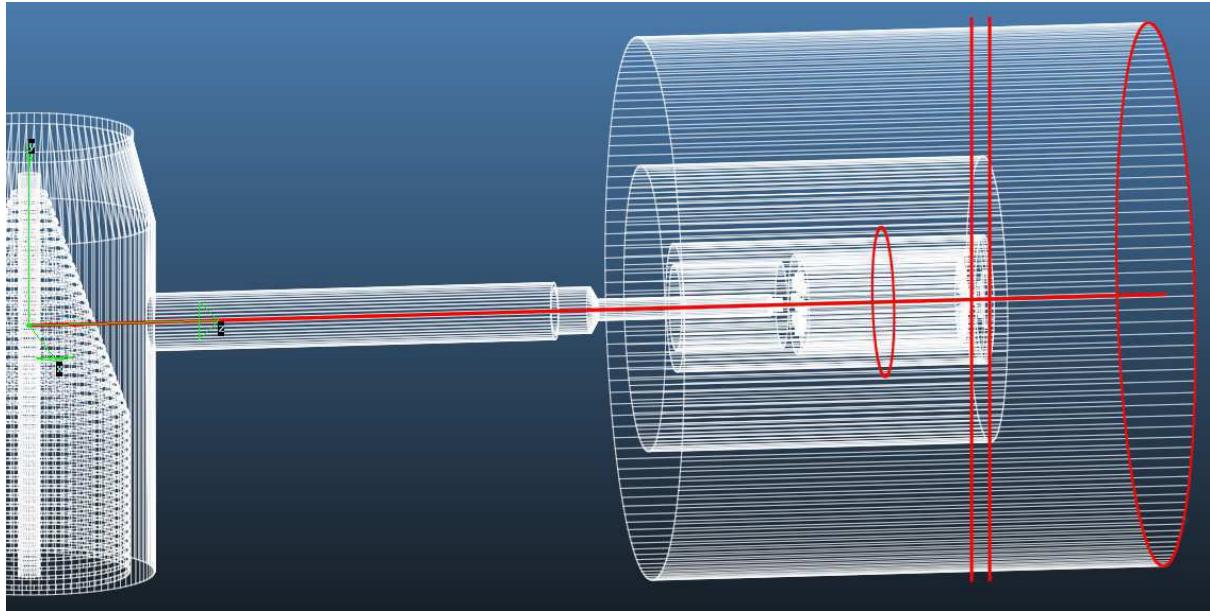


Figure 10 : Différentes facettes de mesure suivant les axes Z et Y

II.3. Résultats de simulation - analyse

Dans cette première simulation nous considérons le cas extrême selon lequel nous n'avons que des atomes neutres qui effusent dans le système.

Après la mise à valeur des paramètres de simulations, nous lançons la simulation et récupérons les données de sortie dès que nous avons des statistiques suffisantes, soit au bout de quelques heures de simulation (10 heures environ). Nous copions ensuite ces données dans Excel afin d'en effectuer l'analyse.

Pour la facette qui traverse le système (Figure 11), nous observons une augmentation très rapide de la pression due à la désorption des atomes de la cible. Elle atteint environ 2,8 mbar et reste en moyenne constante dans le container et la première et la seconde partie du tube de transfert (cylindres de diamètres respectifs 8 mm et 6,5 mm). La pression décroît ensuite à cause de la section réduite du troisième cylindre (diamètre de 3 mm). Elle atteint une valeur de 1,6 mbar en sortie du quatrième tube (section 1,8 mm) qui correspond à la sortie du tube de transfert. Les atomes qui sortent se retrouvent dans un volume plus important (espace inter électrodes = zone bleue de la Figure 16), ce qui explique que la diminution se poursuit de façon significative pour atteindre une valeur de 0,8 mbar en entrée de la zone d'ionisation. La pression reste constante dans la zone d'ionisation puis décroît à cause de l'écran thermique situé juste après la sortie de la zone d'ionisation jusqu'à atteindre une valeur faible et constante de $5,6 \cdot 10^{-5}$ mbar jusqu'à la pompe. Cette évolution de la pression nous renseigne sur la position des différents obstacles à l'écoulement des atomes.

L'identification de ces différentes zones de ralentissement nous pousse à quantifier la contribution de certaines pièces au temps d'écoulement des atomes (temps moyen de vol). Ceci nous permet de dégager des pistes d'amélioration visant à optimiser l'effusion au niveau du tube de transfert, de son trou de sortie, de la grille d'accélération et de la zone entre le trou de sortie et la grille d'accélération (Partie 0).

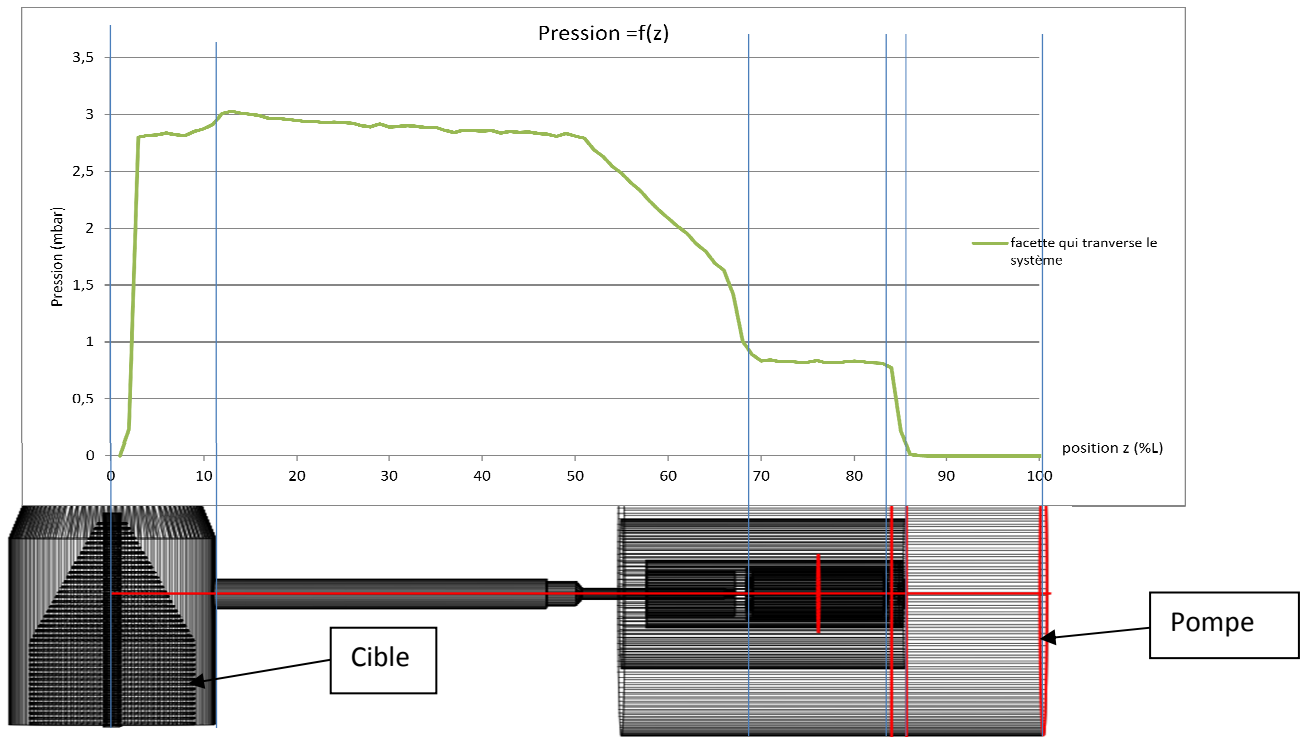


Figure 11 : Evolution de la pression de la cible à la sortie du système (pompe) en fonction de la position sur la facette de mesure

Les autres facettes de mesures disposées suivant l'axe Y nous permettent de voir l'évolution de la pression et du flux de particules au niveau de la zone d'ionisation et de l'écran thermique (Figure 12).

Sur la facette positionnée dans la zone d'ionisation (courbe violette), nous avons une pression de 0,8 mbar à l'intérieur de l'anode (qui délimite la zone d'ionisation) et de 0,4 mbar en moyenne dans l'espace inter électrodes (entre l'anode et la cathode). Nous avons donc un flux de particules plus important dans la zone d'ionisation que dans l'espace inter électrodes.

La courbe rouge représente la pression sur la facette de mesure située entre la sortie de la zone d'ionisation et l'écran thermique. On voit que le niveau de pression est plus important vers la cathode que sur l'axe ($Y=0$). Le diamètre (3 mm) du trou de sortie de la zone d'ionisation est supérieur à celui de l'orifice d'entrée de l'écran thermique (1,4 mm), en conséquence nous avons une probabilité supérieure d'atomes qui seront bloqués par l'écran thermique. C'est ce qui explique la forme (en « M ») de la pression sur cette facette de mesure située entre la sortie de la zone de transfert entre l'écran thermique (courbe rouge). La pression est de 0,4 mbar dans l'espace entre l'anode et la cathode.

Celle sur la facette de mesure située juste après l'écran thermique, est représenté par la courbe bleue qui décrit l'effet inverse observé sur la courbe rouge. Le diamètre des trous de l'écran thermique (1,4 mm, 5 mm et 8 mm) favorisant l'écoulement des particules vers l'axe y.

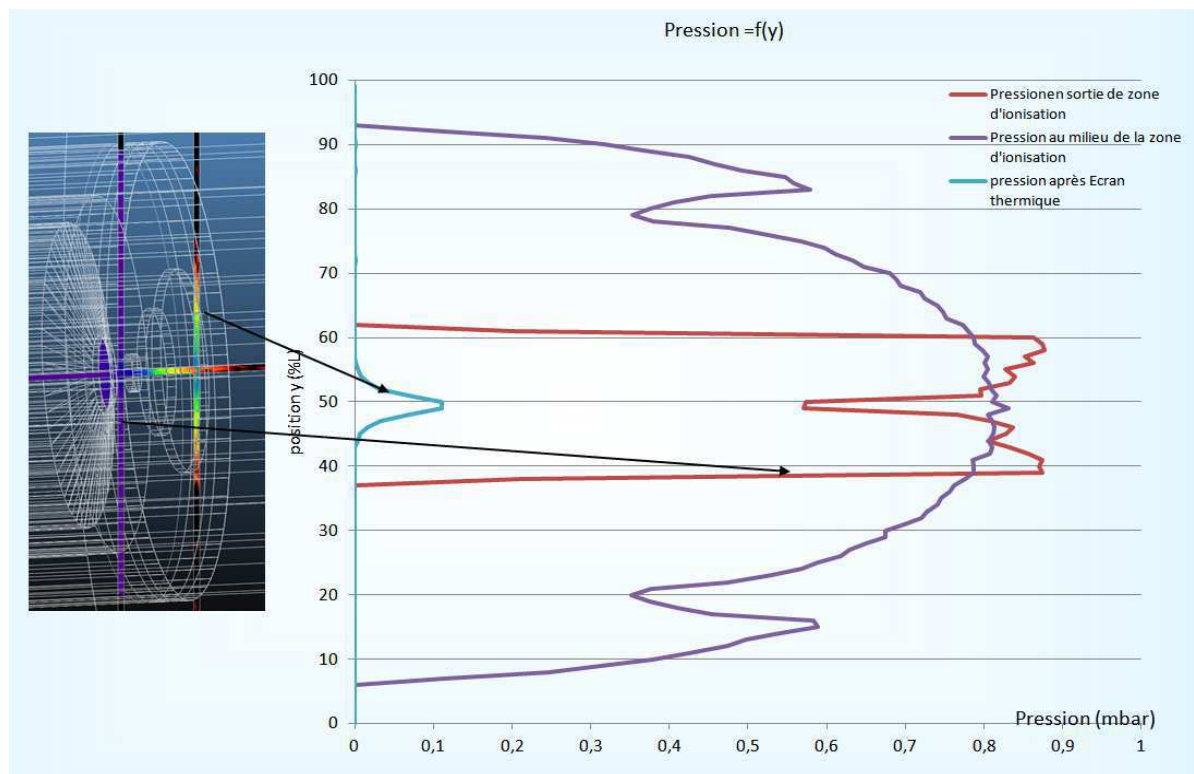


Figure 12 : Evolution de la pression en fonction de la position sur les facettes de mesure positionnées suivant l'axe Y

L'analyse des résultats donnés par la facette de mesure située au milieu de la zone d'ionisation, nous permet de tracer l'évolution du flux sortant (Figure 13) en fonction du temps. On voit que 99% des particules atteignent cette section en 3,15 s. C'est le temps au bout duquel on atteint l'équilibre dans cette zone.

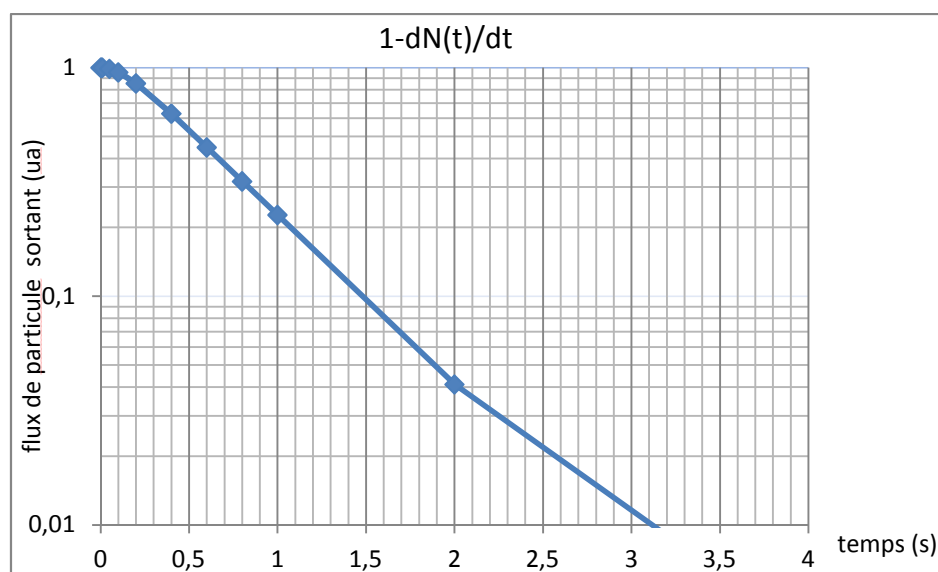


Figure 13 : flux de particules à travers la facette de mesure circulaire placée au milieu de la zone d'ionisation

II.4. Tube d'injection de gaz

Une fois diffusées hors de la cible, les particules effusent dans un premier temps dans le volume délimité par la cible et le container, avant de sortir soit par l'orifice d'entrée du tube de transfert de diamètre 8 mm, soit par celui du tube d'injection de gaz de diamètre 1mm. Par simulation avec une configuration simplifiée (Figure 7) dont on place des pompes en sortie de ces deux tubes, nous obtenons les résultats du Tableau 2. On note que 7% des particules générées par la cible sortent par l'orifice du tube d'injection de gaz, ce qui nous permet de négliger ces pertes.

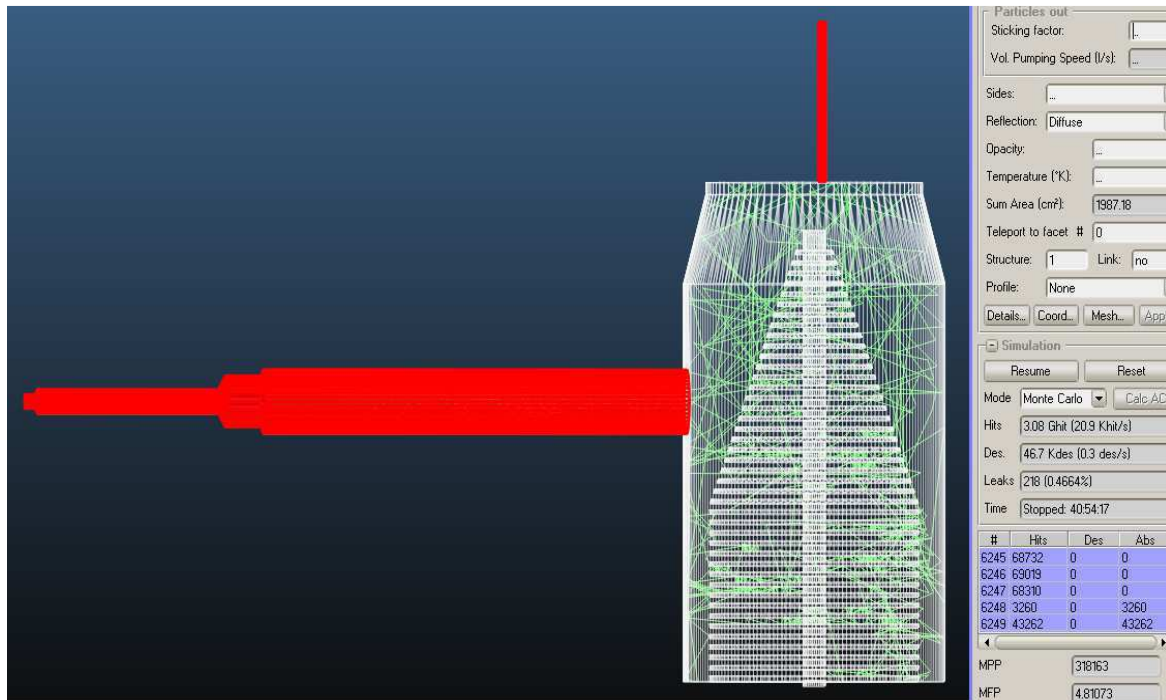


Figure 14 : Les Tubes reliés au volume d'accueil des particules libérées par la cible

simulation		
taux de pompage (l.s ⁻¹)	26,2	8,0
Nombre particule abs	43262	3260
% particule abs	92	7

Tableau 2 : Résultats de calcul de conductance et simulations répartition sortie

II.5. Estimation des temps de vol moyen

Le temps de vol moyen est le temps mis par une particule de son émission par la cible-source jusqu'à son absorption par la pompe qui délimite la sortie du système (zone après l'écran thermique).

L'estimation des temps de vol moyens nous permettra d'effectuer des comparaisons entre les différentes configurations de géométries utilisées lors de nos simulations visant à optimiser l'efficacité du système (partie III).

II.4.a. Temps de vol moyen total

Dans le cas de particules en équilibre thermique, la fonction de distribution des vitesses (Maxwell Boltzmann) est décrite par une fonction normale de probabilité qui a une forme Gaussienne multipliée par la vitesse quadratique (équation 7 et Figure 15).

$$\mathbf{F}(\mathbf{v}) = \mathbf{K} \cdot \mathbf{v}^2 \cdot \mathbf{e}^{-\mathbf{a}\mathbf{v}^2} \quad 4$$

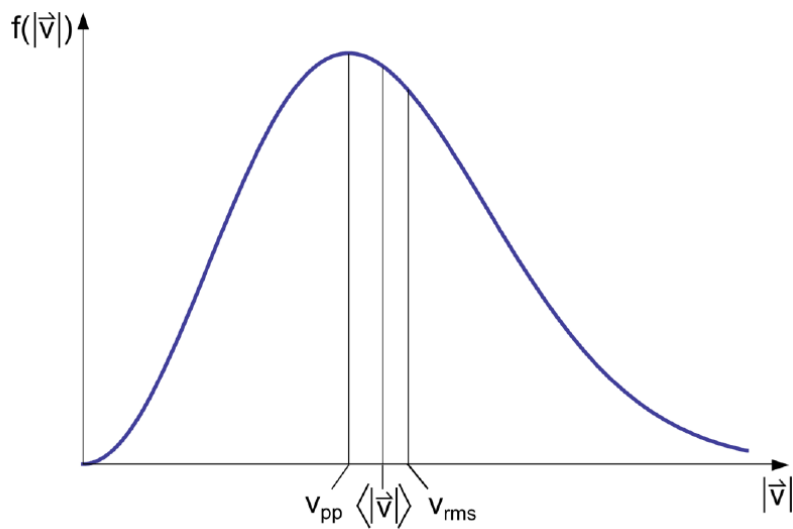


Figure 15 : Distribution de la fonction de Maxwell-Boltzmann des vitesses

On distingue trois vitesses :

- la vitesse la plus probable

$$V_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad 5$$

- la vitesse arithmétique moyenne

$$V_m = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad 6$$

- la vitesse quadratique moyenne

$$V_q = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = V_p \sqrt{\frac{3}{2}} \quad 7$$

Nous choisissons pour les calculs de temps de vol la vitesse la plus probable (équation 7) car elle correspond au maximum de la distribution.

Avec cette vitesse nous calculons le temps de vol moyen des particules avec la formule ci-après :

$$t_{vol} = \frac{d_{eff}}{V_p} = \frac{M}{\sqrt{\frac{2 k T}{m}}} \quad 8$$

avec

d_{eff} = MPP (« Mean Pumping Parth ») : distance moyenne parcourue entre émission par la source et évacuation par la pompe

V_p : vitesse la plus probable

k : constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

$T = 2000 \text{ K}$

$m = n_{\text{protons}} \times 1,67 \cdot 10^{-27} = 6,012 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$ pour l' ^{36}Ar

Une fois que nous avons des statistiques conséquentes (10^4 particules) avec le logiciel, nous procédons à la récupération des données (MPP, nombre de chocs, pression, etc.), puis nous les copions sur un logiciel d'analyse. Avec le test de la référence nous obtenons, en appliquant la formule de l'équation 10, un temps de vol moyen de **5,44 s**. Il s'agit d'un temps moyen car la distance MPP est une moyenne de la distribution des distances parcourues par toutes les particules.

II.4.b. Temps de vol moyen par zone

Pour certains tests, il sera intéressant d'analyser séparément les temps de vol dans les différentes zones du système. Pour cela, nous effectuons le découpage suivant (Figure 16) :

- Zone A : cible et container
- Zone B : tube de transfert
- Zone C : volume entre sortie tube de transfert et enveloppe externe de l'anode (zone d'ionisation)
- Zone D : zone d'ionisation

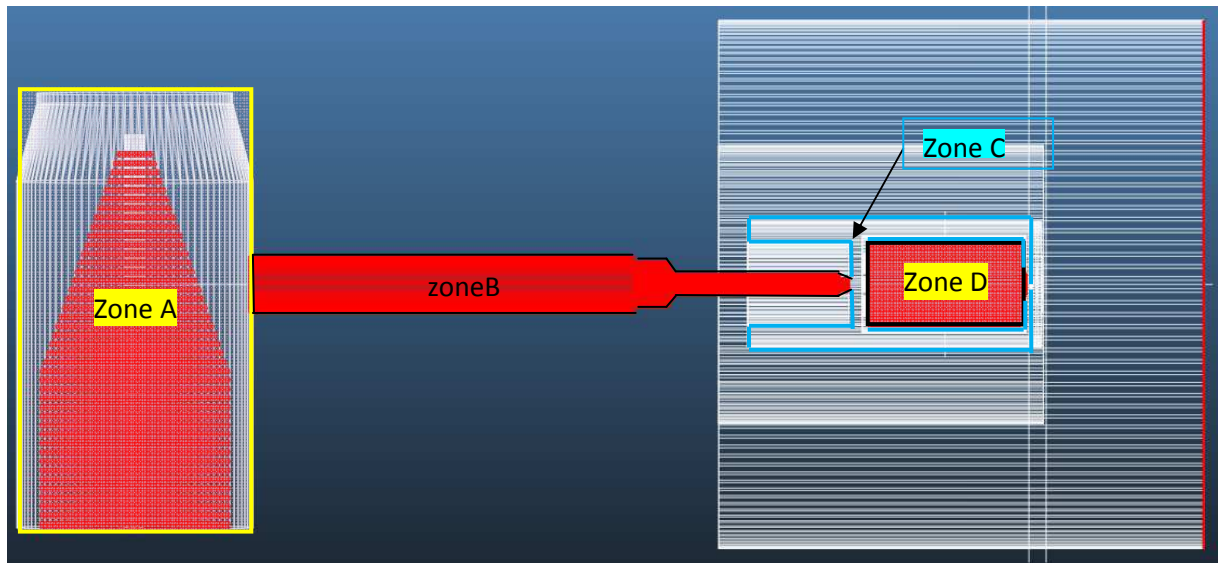


Figure 16 : Localisation des différentes zones sur la géométrie

Pour le calcul du temps de vol dans chaque zone nous effectuons le rapport entre la somme des chocs (Hit) sur toutes les parois qui délimite la zone et le nombre total de particules absorbées. Cette valeur multipliée par le MFP (« Mean Free Parth ») qui est la distance moyenne de parcours d'une particule entre deux chocs, nous donne la distance moyenne de parcours dans la zone. En remplaçant le MPP de la formule de l'équation11 par cette distance moyenne de parcours, nous obtenons le temps de vol moyen dans la zone. Avec cette méthode nous effectuons le découpage en temps de notre test de référence (Tableau 3), ce qui nous montre que le passage des particules dans les zones B, C et D constitue que 7% du temps moyen total et que 92% du temps est due à la zone A. Ce résultat s'explique d'une part par le volume important dans cette zone comparé au reste et d'autre part par l'espace entre les lamelles de la cible qui constituent une zone de confinement des particules et contribue au temps relativement élevés dans cette zone. En guise de vérification, la somme des temps de parcours dans chaque zone nous donne un temps de **5,38 s** sensiblement égal au temps trouvé dans la partie II.4 (5,44 s).

ZONE	A	B	C	D
$t_{vol} (s)$	4,89	0,21	0,18	0,04

Tableau 3 : Répartition temporelle du test référence

Par la suite et selon le cas, nous utiliserons l'une ou l'autre de ces deux méthodes pour la détermination des temps de vol.

III. Pistes d'amélioration

La géométrie précédente nous servira de référence. Dans la suite, les autres configurations seront des copies de la géométrie de référence sur lesquelles nous avons effectué des modifications visant à quantifier la contribution en terme de temps d'effusion de différentes zones (ou pièces) de notre système. Nous agirons sur la configuration de la cible, le tube de transfert et son trou de sortie dont on va modifier le diamètre et ajouterons des systèmes de guide ou blocage des particules dans la partie source.

III.1. Forme de la cible

L'estimation de des temps de vol moyen pour des configurations avec la cible pleine et la cible sapin nous informe sur l'influence de la présence de lamelles dans le cas de la cible sapin. Les résultats obtenus (Tableau 4) nous montrent qu'avec la cible sapin, nous avons un temps de vol moyen supérieur de 24% à celui de la configuration avec la cible pleine. Cela est du à la surface de contact plus importante dans le cas de la cible en sapin qui offre en même temps une efficacité de diffusion plus élevée et une homogénéité du dépôt d'énergie du faisceau primaire. L'optimisation de l'effusion ne devant pas se faire au dépend de l'efficacité de la diffusion une optimisation serait de garder la partie « active » de la cible avec des lamelles et le reste en cible pleine.

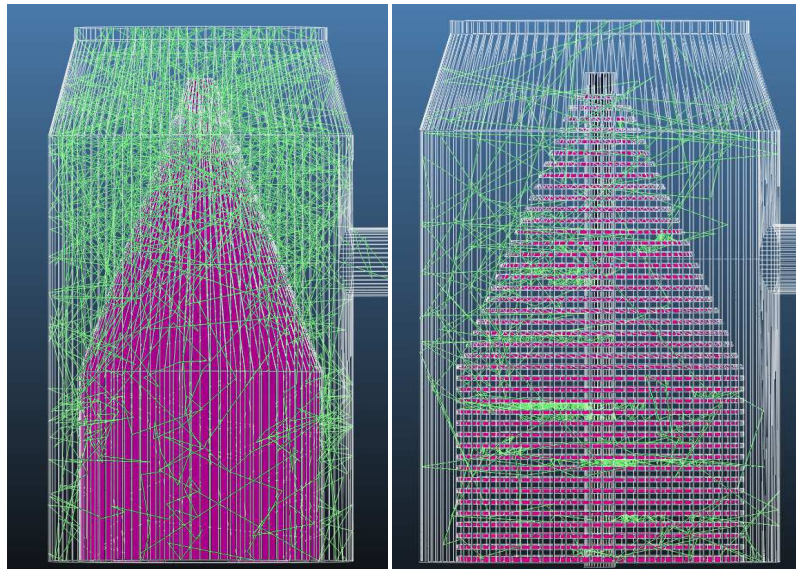


Figure 17 : cible pleine et cible sapin

cible	Sapin (référence)	Pleine	Gain
$t_{vol} \text{ (s)}$	5,38	4,09	24%

Tableau 4 : Temps de vol moyen pour l'estimation de l'influence de la forme de la cible et de l'écran thermique

III.2. Trou de sortie du tube de transfert

Avec l'analyse de la pression à travers le volume du système nous constatons une grande dépression au niveau du trou de sortie du tube, ce qui nous pousse à effectuer des tests avec des géométries similaire à celle de la référence mais avec des diamètres de trou de sortie du tube de transfert différent. Les résultats consignés sur le Tableau 5, nous permettent de tracer le graphique de l'évolution du temps de vol en fonction du diamètre de trou de sortie (Figure 18). Nous avons une augmentation significative du temps de vol de 83% pour un diamètre de 1 mm et une diminution de 18% pour un diamètre de 3 mm. Ces premiers résultats de comparaison nous renseignent sur la contribution en termes de conductance du système à ce niveau.

Diamètre (mm)	1	1,8 (réf.)	3
t_{vol} (s)	9,84	5,38	4,40

Tableau 5 : Temps de vol pour différentes diamètres de trou de sortie du tube de transfert

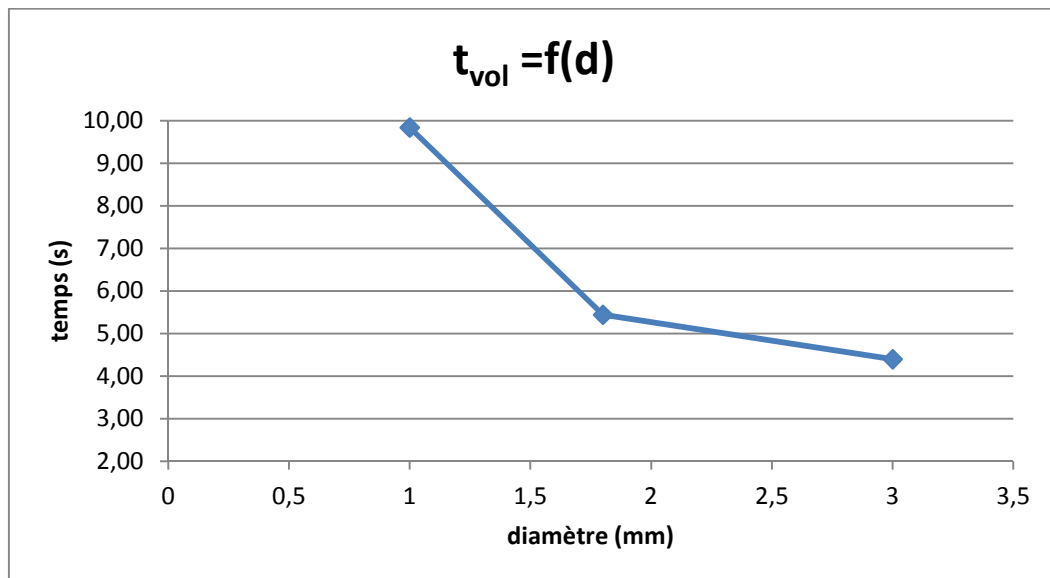


Figure 18 : Evolution du temps de vol en fonction du diamètre de trou de sortie du tube de transfert

III.3. Tube de transfert

Le tube de transfert actuel est composé de trois cylindres de diamètre différent (Figure 19 a) et constitue le volume dans lequel sont obligé de passer les particules pour atteindre la zone d'ionisation de la source VADIS.

Nous choisissons d'utiliser un tube de transfert de forme conique (Figure 19 b) afin de comparer le temps d'écoulement. Pour le tube conique, nous gardons les mêmes dimensions de section d'entrée et de sortie du tube actuel. On isole les deux tubes dont on effectue des simulations pour les deux cas en considérant l'entrée comme la source et la sortie comme la pompe. Les

résultats obtenus (Tableau 6) nous montrent une diminution de 33% du temps d'effusion dans le tube conique.

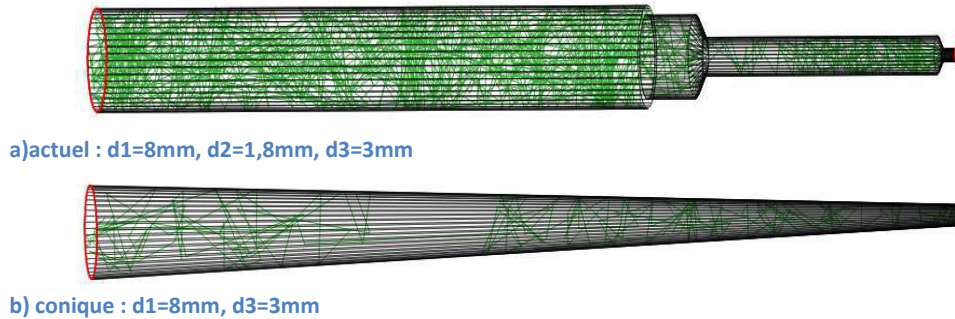


Figure 19 : Forme tube de transfert

	tube actuel	tube conique	Gain
$t_{vol} (s)$	0,52	0,17	67%

Tableau 6 : temps de vol dans le tube actuel et modifié

En remplaçant le tube actuel par le tube conique dans le système complet (Figure 19) tout en gardant les mêmes conditions de simulations, nous avons une augmentation de 18% du temps moyen comparé au temps obtenu avec la référence (

Configuration avec tube	actuel	conique	Gain
$t_{vol} (s)$	5,38	6,34	-18%

Tableau 7). Cet effet non désiré est due au retour plus important de particules dans le container avec le tube conique comparé au tube actuel dont l'architecture limite cet effet. Ce résultat nous montre également, comme démontré dans l'annexe 2, que les trois cylindres qui constituent le tube de transfert ont des dimensions optimales pour l'effusion (rapport longueur sur diamètre).

Cette analyse nous permet d'écarter le tube de transfert sur la liste de pièce à modifier pour cette étude d'optimisation de l'effusion.

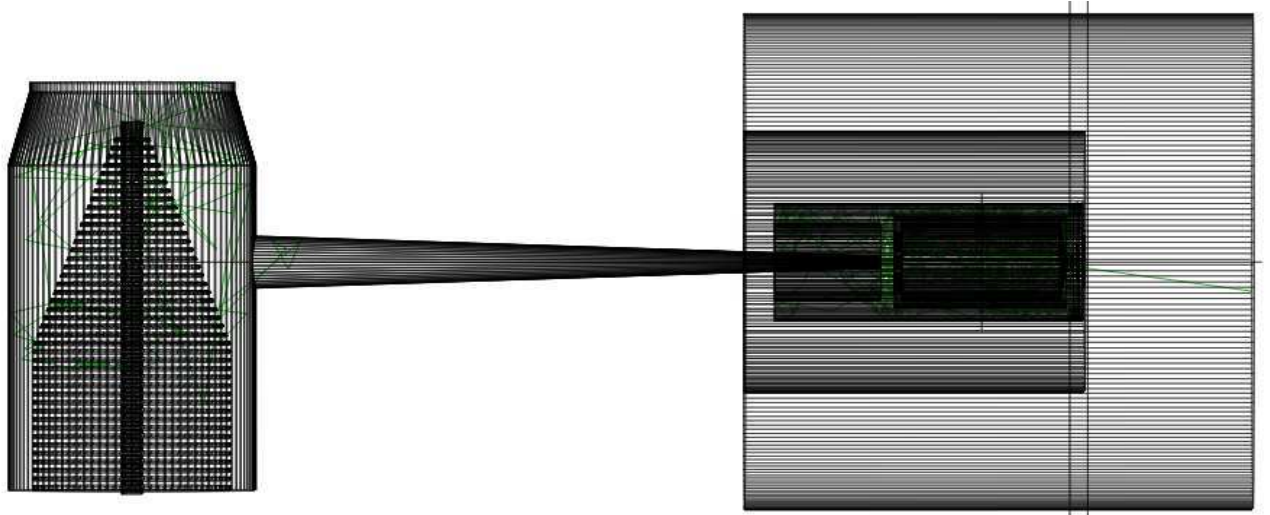


Figure 20 : Géométrie avec tube de transfert conique

Configuration avec tube	actuel	conique	Gain
$t_{vol} (s)$	5,38	6,34	-18%

Tableau 7 : Temps de vol moyen des particules

III.4. Trous grille d'accélération

La grille d'accélération constitue l'entrée de la zone d'ionisation et est de forme circulaire avec des trous de 1,6 mm de diamètre. La version actuelle de cette grille est issue d'une succession de modifications visant à optimiser à la fois la transmission d'atomes et l'émission d'électrons.

Nous choisissons d'augmenter le diamètre de ces trous (Figure 21) afin d'augmenter le nombre de particules qui pénètre dans la zone d'ionisation.

Les résultats obtenus (Tableau 8) nous renseignent sur la faible diminution (4%) du temps de vol avec ces modifications, ce qui nous permet d'écarter cette pièce de notre liste de piste d'amélioration.

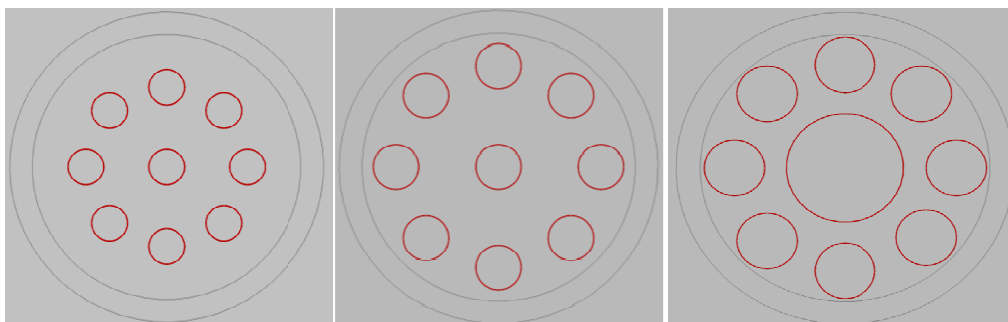


Figure 21 : augmentation diamètre trou de sorti grille d'accélération (à gauche la réf. avec un diamètre de 1.6 mm, au milieu 2mm, 2,5 et 4,98 mm à droite)

configuration grille	actuelle	modifiée	modifiée
d3 (mm)	1,6	2	2,5 & 4,98
t _{vol} (s)	5,38	5,15	5,16
Gain	-	4%	4%

Tableau 8 : Comparaison temps de vol moyen pour différents diamètres de grille d'accélération

III.5. Autres pistes d'amélioration (écrans & entonnoir)

Une partie des particules, une fois sorties du tube de transfert se retrouve dans un volume comme le montre la Figure 22.a. Cette zone constitue le volume d'accueil des particules provenant du tube de transfert avant de ressortir soit par la grille d'accélération, soit par l'espace entre l'anode et l'électrode sans passer par la zone d'ionisation. L'objectif étant de réduire au maximum le nombre de particules perdues (qui ne passent pas dans la zone d'ionisation). Dans cette logique nous mettons en place deux écrans (Figure 22.b) en début de zone C de sorte à avoir un confinement des particules entre le trou de sortie du tube de transfert et de la grille d'accélération.

On décide aussi dans une autre configuration de mettre en place un entonnoir à la place de l'écran situé au niveau du trou de sortie du tube de transfert de manière à avoir une sorte de guide pour les particules dans le volume de l'entonnoir (Figure 22.c). L'écran qui est au niveau de la grille d'accélération empêche les particules en provenance de la sortie de la zone d'ionisation de revenir. Elle permet aussi de visualisé grossièrement la proportion de particules qui ne traverse pas directement l'écran thermique une fois sortie de la zone d'ionisation.

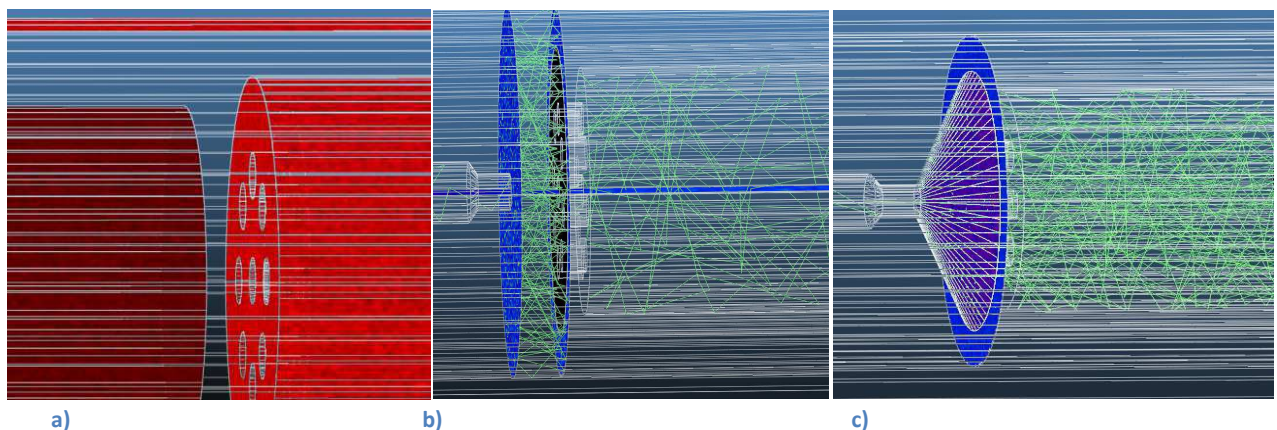


Figure 22 : modification espace entre trou de sortie tube transfert et grille d'accélération (a : limite de l'espace, b : emplacement de l'écran, c : emplacement de l'entonnoir)

Avec ces deux nouvelles configurations nous effectuons les simulations correspondantes toujours avec les mêmes conditions de simulations. L'exploitation des résultats nous permet d'effectuer une comparaison de ces deux configurations avec la référence. Ainsi avec la représentation de la pression (Figure 23) sur la facette de mesure de la zone d'ionisation, nous

constatons que pour le cas de la configuration avec écran (courbe rouge) nous avons une légère augmentation du nombre de particules qui traverse la zone d'ionisation. Dans ce cas les particules présentes en dehors de la zone d'ionisation sont celles qui ne traversent pas l'écran thermique. Ceci nous montre la proportion important de particules bloquées par l'écran thermique.

Nous avons également une diminution du temps de vol moyen comparé au temps de référence (Tableau 9), qui est due au non retour des particules dans la zone entre la cathode et l'anode.

La courbe verte qui représente la pression pour la configuration avec entonnoir suit la même tendance que la courbe rouge, nous avons également une diminution non négligeable du temps de vol moyen de 15.2%.

En termes de flux (Figure 24), nous avons la même tendance avec une légère diminution du temps d'établissement du régime stationnaire de l'écoulement surtout dans le cas avec l'écran seul, ce qui traduit l'arrivée plus rapide de particules dans la zone d'ionisation. C'est une piste d'amélioration mais la difficulté technologique est grande pour sa réalisation.

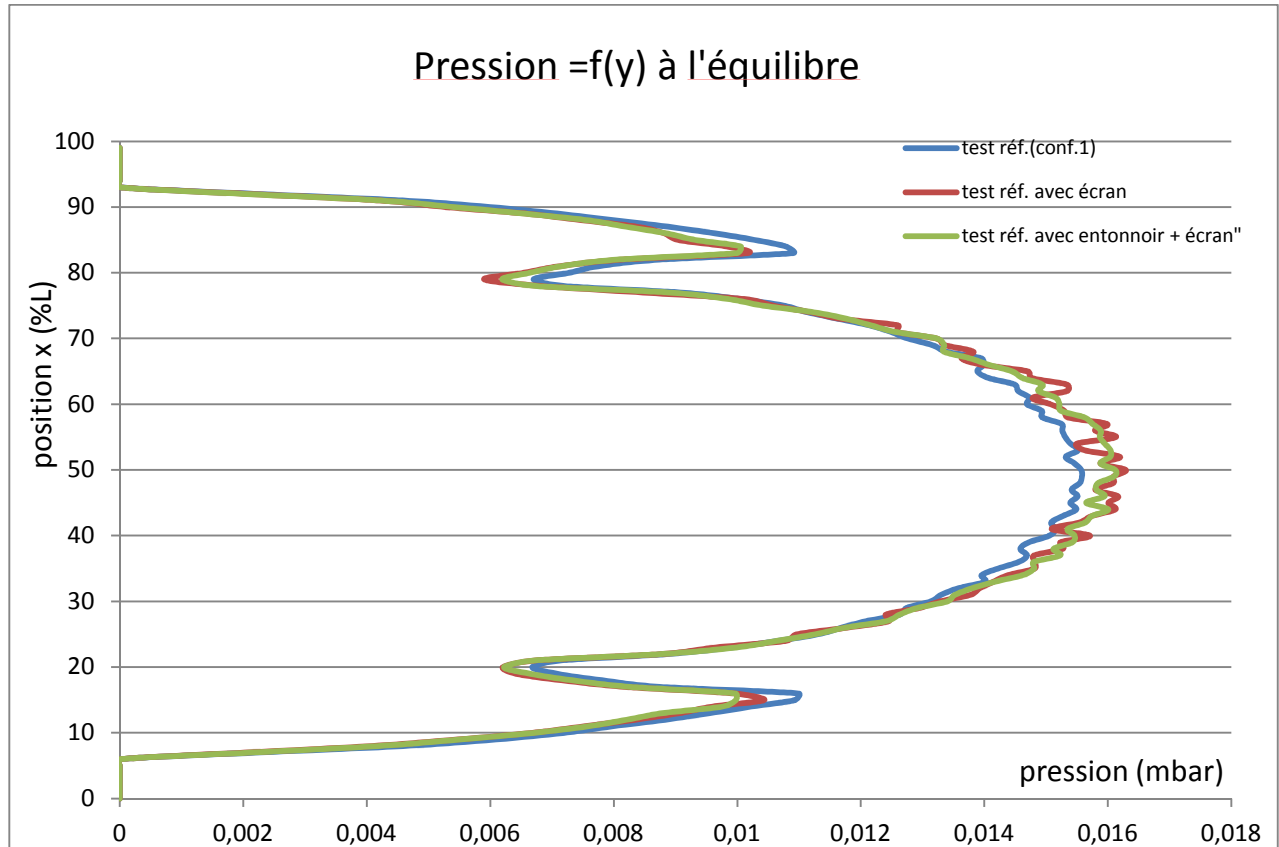


Figure 23 : Pression sur la facette située au niveau de la zone d'ionisation

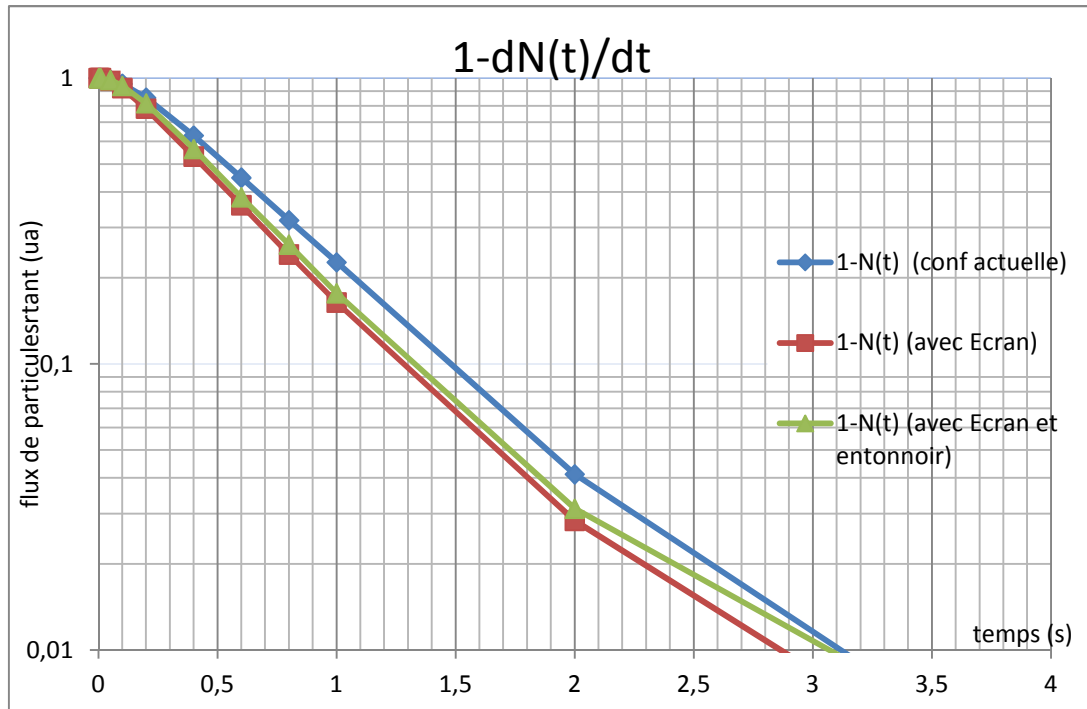


Figure 24 : flux de particules sortant sur la facette située au niveau de la zone d'ionisation

Ecran	sans	avec	avec + entonnoir
$t_{vol} (s)$	5,38	4,97	4,56
Gain		7,6%	15,2%

Tableau 9 : temps de vol moyen pour différentes configurations

IV. Simulations d'effusion d'atomes ionisés

V.

IV.1 Mise en place d'une pompe dans la zone d'ionisation

Dans cette partie nous mettons en place une facette pompe au milieu de la zone d'ionisation. Cette facette est paramétrée avec un coefficient d'absorption de 100%, ce qui nous permet de supposer que toute particule absorbée par cette pompe est considéré comme un ion. Nous avons choisi cette position dans le but de reproduire le plus possible l'effusion des atomes jusqu'à cette zone et d'obtenir des temps réalistes.

Ces nouveaux tests sont effectués avec les mêmes configurations de géométrie retenues lors des pistes d'amélioration (partie 0) à l'exception de l'ajout de la pompe de même section que l'enveloppe interne de la zone d'ionisation. Nous nous retrouvons donc avec deux pompes. La quasi-totalité des particules sont absorbées par la pompe située dans la zone d'ionisation. De ce fait le

temps moyen parcouru est dû principalement à ces particules ionisées. Le temps de parcours d'une particule ionisée jusqu'à la sortie du système est négligeable en comparaison avec le temps de vol des atomes. Une fois dans le volume actif de la zone d'ionisation, l'ion est capté et accéléré par le champ électrique créé par l'application d'une tension sur l'ensemble de l'ECS. En réalité le nombre de particules ionisées ne représente qu'environ 20%, c'est la raison pour laquelle nous adoptons ces hypothèses qui nous permettront de comparer les temps de vol moyens dans ces deux cas extrêmes : configuration 1 pas d'ionisation et configuration 2 100% d'ionisation.

Le découpage en temps (Tableau 10) nous montre que le temps total de vol pour la simulation avec notre nouvelle configuration de référence est de **2,64 s**, ce qui signifie une diminution de **51%** du temps total comparé au test de référence des autres parties II et O (5,38 s). On note également cette même diminution dans chaque zone et plus fortement dans les zones C et D. Ce temps obtenu avec la considération d'avoir que des ions en sortie de système (pompe dans la zone d'ionisation) nous permet d'avoir un temps moyen plus réaliste comparé au temps de détection d'un faisceau d'ions lors de la mise ON du système qui est d'environ 1 s.

ZONE	A	B	C	D
t_{vol} (s)	2,52	0,11	0,01	0, 2.10 ⁻³

Tableau 10 : Répartition temporelle avec test avec pompage dans la zone D

IV.2 Analyse des pistes d'amélioration la nouvelle configuration

Avec écrans et entonnoir

Les résultats de test effectués avec cette nouvelle configuration (Figure 25), nous donne des temps de vol moyens jusqu'à la pompe dans la zone d'ionisation inférieurs à ceux obtenus avec la configuration 1 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) d'une valeur moyenne de **25%**. Nous rappelons que le temps moyen de vol pour notre cas référence configuration est de **5.38 s** et pour la configuration 2 de **2.64 s**.

Alors que pour la configuration 1, on constate une diminution du temps en utilisant aussi bien les écrans ou la combinaison écran – entonnoir (voir § III.5 tableau 10); pour cette nouvelle configuration ; l'ajout soit des écrans soit de la combinaison écran – entonnoir résulte par une augmentation du temps de vol moyen de **35%** environ. Ce résultat va à l'encontre de celui obtenu dans la configuration 1 où on a admis une amélioration.

L'hypothèse permettant d'expliquer ce résultat serait la suivante : les écrans comme la combinaison entonnoir – écran favorisent le retour des particules vers le tube transfert et le container cible augmentant ainsi le temps de vol moyen. Ce processus aussi existant dans la configuration 1 semble donc plus majoritaire dans la configuration 2. Pour valider cette hypothèse, il faudrait utiliser une facette de mesures dans le tube transfert pour quantifier le nombre de particules qui y reviennent et ainsi expliquer ces différents comportements.

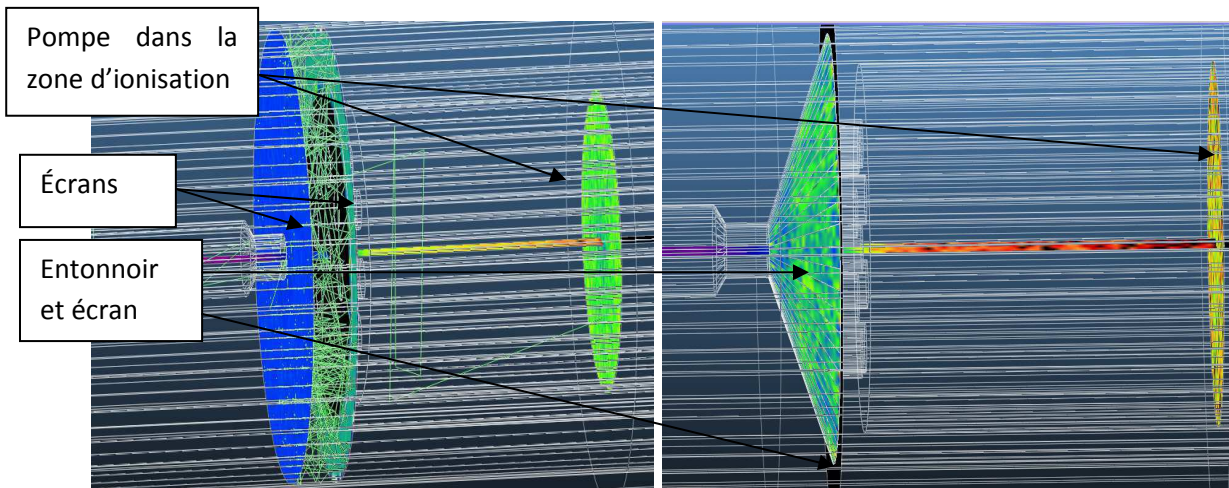


Figure 25 : configuration avec les écrans et la pompe dans la zone d'ionisation

Configuration	ZONE	A	B	C	D	Tvol total
Avec écrans	t_{vol} (s)	3,50	0,15	$2 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	3,65
	t_{vol} (s) (réf)	4.59	0,20	0,13	0,04	4,97
Avec écran et entonnoir	t_{vol} (s)	3,34	0,14	10^{-3}	10^{-4}	3,49
	t_{vol} (s) (réf)	3.10	0,13	0,68	0,64	4,56

Tableau 11 : Temps de vol par zone et total ; les cellules en vert correspondent à la configuration 2 tandis que celles en jaune correspondent à la configuration 1

CONCLUSION

Ces travaux effectués lors de mon stage M2 m'ont permis de poursuivre mon apprentissage débuté lors de mon premier stage M1 concernant la production des ions exotiques et d'approcher ainsi les phénomènes en jeu lors de cette production : la diffusion, l'effusion et l'ionisation des particules.

Lors des différentes simulations effectuées avec Molflow, nous avons pu nous poursuivre la familiarisation avec ce programme et en comprendre les subtilités grâce à une collaboration étroite avec ses concepteurs au CERN.

Ce logiciel nous permet d'avoir accès à des paramètres tels que la conductance, la pression, le nombre de collisions et les distances parcourues par les particules (MFP et MFP) ainsi que les évolutions temporelles.

Grâce à certains de ces paramètres, nous avons pu évaluer des temps d'effusion dans un ECS FEBIAD (une première pour ce type d'ECS en utilisant MOLFLOW) et mettre en avant l'influence de la forme des enceintes de notre système. La méthode élaborée pour l'estimation des temps d'effusion peut être appliquée aussi bien pour l'optimisation des géométries des cibles UCx (en uranium) pour SPIRAL 2 phase2 et pour les cibles en carbone pour SPIRAL 1 lors de ma prochaine période de stage à GANIL.

Cette étude m'a permis d'approfondir mes connaissances sur le fonctionnement des sources en général et plus précisément sur celui de l'ECS-FEBIAD.

L'évolution de la pression calculée grâce à Molflow, nous a permis d'étudier les différentes zones géométriques de ce nouvel ECS et de dégager des pistes d'améliorations. Le temps de vol moyen est surtout dû à la forme de la cible et à son container. Il serait possible d'optimiser cette zone (A) en faisant une combinaison cible sapin cible pleine et donc raccourcir le temps de vol moyen.

Nous avons pu observer une diminution nette d'environ **20%** du temps d'effusion des atomes, avec une augmentation du trou de sortie du tube de transfert.

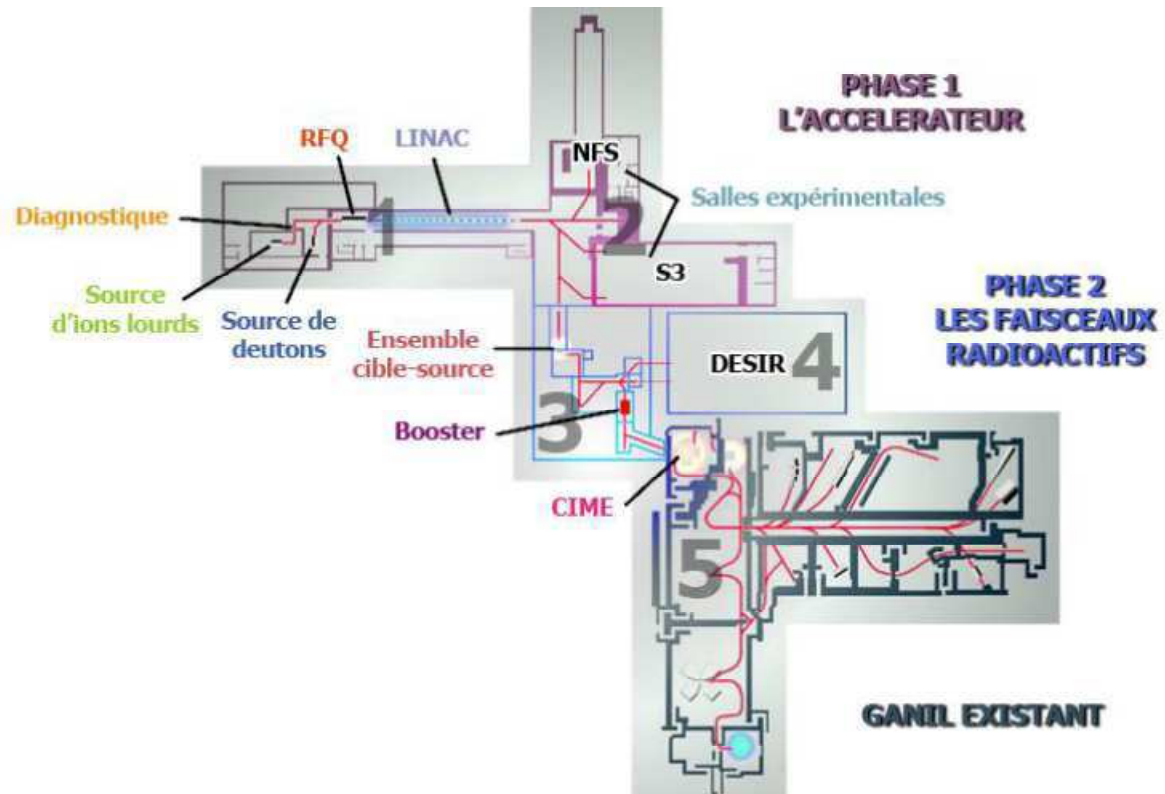
Dans les autres cas, nous avons pu éliminer certaines pistes qui n'offraient pas un résultat espéré. C'est le cas de la modification au niveau de la forme du tube transfert malgré un gain notable de 67% seul, une fois remis dans le système c'est une perte de **18%**. Pour l'augmentation du trou de la grille d'accélération, la diminution du temps de vol moyen est trop faible pour être considéré réaliste. L'utilisation d'écrans ou de combinaison écran – entonnoir a suscité des espoirs dans la configuration 1 MAIS a démontré des effets négatifs dans la configuration 2. Etant donné que ces configurations sont les 2 cas extrêmes du fonctionnement de l'ECS FEBIAD, on ne peut retenir ces solutions.

Les résultats obtenus lors de cette étude nous encouragent à vouloir poursuivre ces travaux avec les projets en cours et futurs dans le cadre de la production d'ions radioactifs. Les travaux menés au CERN qui portent sur l'évolution du programme Molflow permettent une utilisation plus large de ce code pour mieux appréhender le fonctionnement de notre nouvel ECS.

Ce stage a totalement répondu à mes attentes. En effet j'ai continué mon apprentissage au travers d'échanges très enrichissants avec l'ensemble des collaborateurs. Tout cela me donne envie de poursuivre dans ce type de structure et dans ce domaine d'étude des ions exotiques.

Annexe1 : Plans GANIL, ECS-FEBIAD

A. Plans installations GANIL



Plan des installations

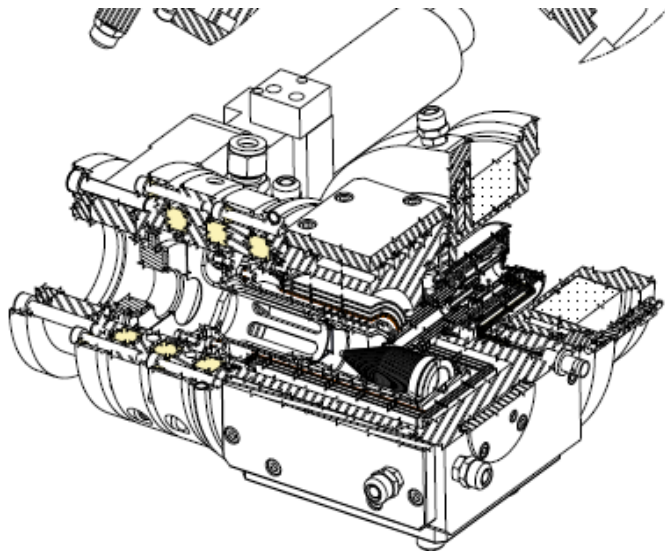
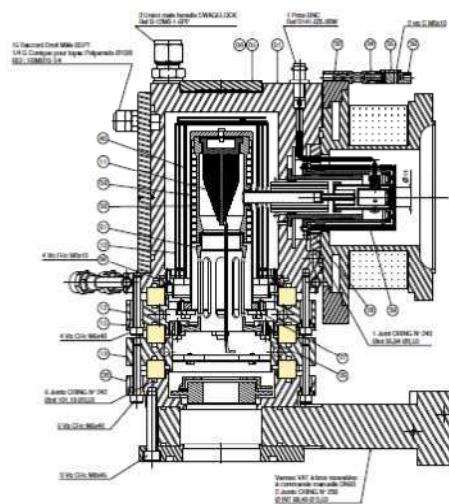


Photographies de l'ensemble cible-source de SPIRAL

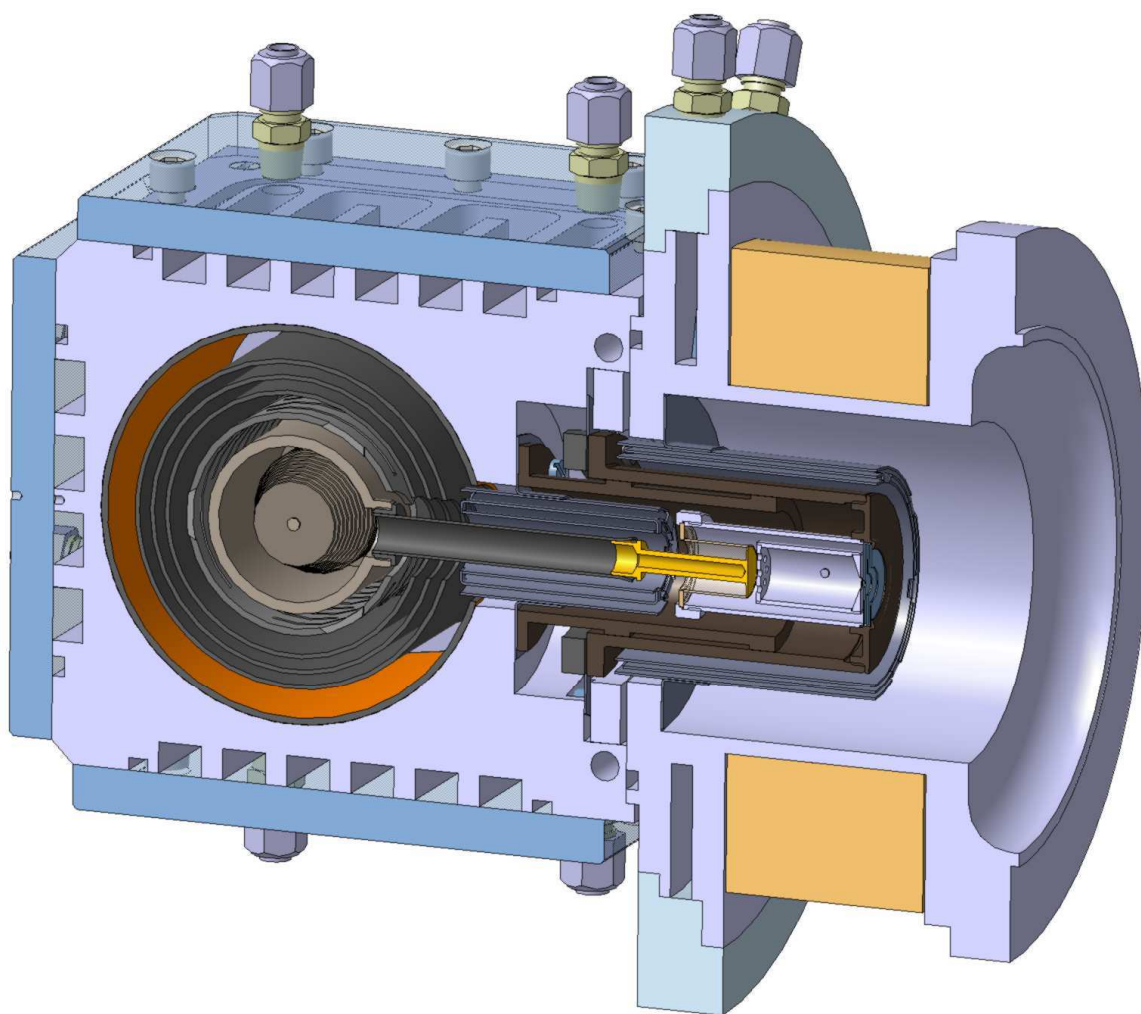


Photographie d'une ligne de faisceau

B. ECS-FEBIAD (plan 2D ET 3D)



Plan 2D de l'ECS-FEBIAD



Plan 3D de l'ECS-FEBIAD

C. *ECS NANOGEN III*



ECS-NANOGEN III

Annexe 2 :

Références

Sites consultés :

[1] <http://www.ganil-spiral2.eu>

[2] <http://test-molflow.web.cern.ch>

Publications:

[3] L.Penescu, R.Catherall, J.Lettry, T.Stora
Development of High efficiency Versatile Arc Discharge Ion Source.
CERN BE Department, CH 1211 Geneva, Switzerland
September 2009

[4] P. G. Bricault,

[5] B. Roussi re, O. Bajeat, and collaborators
Release of Kr, Ag, Sn, I and Xe from UCx targets
17 February 2006

[6] Fredrik Wenander
Ion sources for radioactive beams- and the extra options
XXXVIIIth RENCONTRE DE MORIOND Les Arcs
Mars 2003

Thèses:

[9] Madame Claire Couratin
Mesures de précision avec LPCTrap et développements techniques à
GANIL : corrélation angulaire b ta-neutrino et probabilité de
shakeoff dans la décroissance de l' $^6\text{He}^+$, étude de la production de nouveaux faisceaux à SPIRAL.
Université de Caen Basse-Normandie. 18 Octobre 2013